СПбГУТ)))

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

НТК ППС

66-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ:

- Инфокоммуникационные сети и системы
- Информационные технологии и программная инженерия
- Социальные технологии и экономика данных
- Радиоэлектронные системы и робототехника
- Кибербезопасность
- Сети связи специального назначения

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

2026



ntk.sut.ru

УДК [621.39:004]:061.3(082)
ББК 72

С 18 **66-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2026)**; сб. науч. ст. / Под. ред. А. В. Рабина; сост. А. А. Дзюбаненко, И. М. Татарникова. СПб.: СПбГУТ, 2026. 1256 с.

Рецензент – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) **Колбанев М. О.**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Киричек Р. В. – доктор технических наук, профессор, ректор СПбГУТ

Заместитель председателя

Рабин А. В. – доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе СПбГУТ

Ответственный секретарь

Дзюбаненко А. А. – кандидат технических наук, доцент, начальник управления организации научной работы и подготовки научных кадров СПбГУТ

Члены программного комитета

Елагин В. С. – кандидат технических наук, доцент, и.о. декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем СПбГУТ

Владыко А. Г. – кандидат технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектронных систем и робототехники СПбГУТ

Литвинов В. Л. – кандидат технических наук, доцент, и.о. декана факультета информационных технологий и программной инженерии СПбГУТ

Зикратов И. А. – доктор технических наук, профессор, декан факультета кибербезопасности СПбГУТ

Шутман Д. В. – кандидат политических наук, доцент, декан факультета социальных технологий и экономики данных СПбГУТ

Гирш В. А. – полковник, начальник военного учебного центра СПбГУТ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Абилов А. В. – кандидат технических наук, доцент, первый проректор – проректор по учебной работе СПбГУТ

Сопредседатель

Савченко А. Ю. – проректор по молодежной политике и воспитательной работе СПбГУТ

Ответственный секретарь

Татарникова И. М. – шеф-редактор объединенной редакции рецензируемых научных изданий СПбГУТ

Члены организационного комитета

Дружков К. В. – кандидат экономических наук, директор департамента экономики и финансов СПбГУТ

Ивасишин С. И. – кандидат технических наук, директор департамента организации и качества образовательной деятельности СПбГУТ

Лысов А. Н. – директор департамента по эксплуатации и развитию материально-технического комплекса СПбГУТ

Гуршал К. Ю. – начальник управления маркетинга и рекламы СПбГУТ

Зыкова Н. В. – начальник управления информационно-образовательных ресурсов СПбГУТ

Лупой Р. С. – начальник управления информатизации СПбГУТ

В научных статьях участников конференции исследуются тенденции развития информационных технологий и телекоммуникационной отрасли, новейших достижений в науке и образовании. Предлагаются инновационные решения на основе информационных и коммуникационных технологий в образовании, науке, технике, экономике, социальной сфере и других областях.

Предназначено научным работникам, аспирантам и студентам старших курсов телекоммуникационных и политехнических вузов, инженерно-техническому персоналу и специалистам отрасли связи.

Сайт конференции
www.ntk.sut.ru

ISBN 978-5-89160-399-8
© СПбГУТ, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Инфокоммуникационные сети и системы 13

Абрамова Н. И., Воробьев П. В., Лящук М. З. Управление процессом регулирования потоков сообщений 13

Абрамова Н. И., Задбоев В. А., Сарафанников В. С. Анализ распространения сигнала сетей 5G в городской среде 19

Абрамова Н. И., Лящук М. З. Использование стандартизованных интерфейсов при групповом применении роботизированных комплексов различного базирования 23

Александров И. В., Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Шаброва Е. В. Регулирование и мониторинг использования радиоэлектронных средств беспилотных авиационных систем 30

Аль-Анси А. М., Виницкий М. А., Дусталев Е. В., Кучерявый А. Е. Анализ методов распределения ресурсов для сетей автомобильного транспорта 36

Багаев Е. С., Фокин Г. А. Исследование влияния доплеровского сдвига на точность определения времени прихода сигнала с помощью алгоритма Music 42

Билятдинов К. З., Лобеев Д. П. Применение узкополосных моделей для проектирования мест пересечения сетей радиосвязи на высокоскоростной железнодорожной магистрали 48

Бобровский А. В., Симонина О. А. Исследование сигнала MIMO-OFDM методом RAY TRACING 52

Брюшинин А. Ю., Волков А. Н., Второв О. П., Дмитриева В. В. Разработка TINYML-метода взаимодействия между сверхплотной сетью костюма телеприсутствия и метавселенной 58

Бучатский А. Н., Кузьмина Д. Д. Метод калибровки и программной компенсации латеральной хроматической аберрации для задач цветокоррекции в системах смешанной реальности 63

Бучатский А. Н., Тафинцев К. Е. Экспериментальная верификация простейшей математической модели собственных мод колебаний в мембранной акустической системе 70

Былина М. С., Бразовский Г. Р., Глаголев С. Ф., Полякова Е. В. Новая образовательная программа подготовки магистров «Оптические и квантовые технологии в инфокоммуникациях» 76

Былина М. С., Фраз А. В. Моделирование и исследование статического фурье-спектрометра 82

Виноградов П. Ю. О возможности применения натрий-ионных аккумуляторных батарей в электропитающих установках телекоммуникационного оборудования 88

Виноградов П. Ю., Михайлов Р. А. Разработка и исследование имитационной модели гибридной системы электропитания базовой станции 5G в среде MathWorks Simscape 93

Владимиров С. С., Хоанг К. Т. Подход к интеграции методов сетевого кодирования в среду моделирования ns3 98

Владимирова Е. С., Паращук И. Б., Яровой Р. В. Программно-определяемые дата-центры с искусственным интеллектом: особенности нового мейнстрима развития инфокоммуникационных систем для хранения и обработки данных 103

Ворончук В. И., Ковалев И. С. К вопросу повышения обоснованности при управлении системами специального назначения 109
Вторых В. С., Коротин В. Е. Гетерогенные решения для реализации сценариев IMT-2020 114
Вяльшин Э. С., Федоров С. Л. Анализ применимости персептрона и нейронной сети Колмогорова-Арнольда в интеллектуальных системах технического зрения автономного водного транспорта 119
Вяльшин Э. С., Федоров С. Л. Исследование свойств распределения глубины многослойного персептрона (MLP) и нейронной сети Колмогорова-Арнольда для применения в интеллектуальных системах технического зрения автономного водного транспорта 125
Галактионов И. В., Колесников О. В., Месяцев М. А., Топоровский В. В. Алгоритмы адаптивной коррекции волнового фронта для повышения эффективности передачи в атмосферных оптических линиях связи 131
Галактионов И. В., Колесников О. В., Топоровский В. В. Оптимизация параметров пьезоактюаторного деформируемого зеркала для задач передачи лазерного излучения в атмосферных оптических линиях связи 125
Галактионов И. В., Колесников О. В., Топоровский В. В., Шарафисламов А. А. Как работает LI-FI: принципы оптической передачи гигабитных данных 141
Гелдымырадова М. К., Розыев И. Анализ устойчивости и адаптивности модели управления трафиком в городских мультисервисных сетях связи 146
Глаголев С. Ф., Доценко С. Э. Поддержание квазисолитонного режима в ВОСС с чередованием участков нормальной и аномальной дисперсии при рамановском усилении 150
Голубев Ю. Н., Паращук И. Б., Селезнев А. В. Формирование требований, предъявляемых системами искусственного интеллекта к инфокоммуникационной инфраструктуре современных и перспективных центров обработки данных 157
Гончаров Р. К., Киселев А. Д., Наумчик А. С. Эффекты неидеальности измерений в анализе протоколов КРКНП 163
Горынцев А. А., Фёдоров С. Л. Применение технологии Wi-Fi HaLow для передачи видеопотока 167
Гуминский О. А., Ковалгин Ю. А. Имитационная модель блока временной синхронизации приемного оборудования системы DRM 172
Дмитриева Ю. С. Разработка метода комплексной оценки параметров QOS в сетях SDN 179
Дуклау В. В., Смаглиенко Т. Г., Федоров С. Л. Методика проведения дистанционных лабораторных и практических занятий для студентов очной формы обучения 185
Елагин В. С., Читанава А. И. Особенности протокола TSN и его применения в мобильных сетях связи 189
Зеневич А. О., Кочергина О. В., Терех И. Л. Измерение удельной теплоемкости жидкостей с помощью шумовых диодов 195
Игуменов А. Ю., Мельников И. В., Соколов В. А. Многофункциональный комплекс природного мониторинга 199
Канаев А. К., Прошин Ф. А. Применение ПИД-регулятора при синхронизации шкалы времени на мультиплексоре OTN 205
Качнов А. В., Перес-Кальдерон Д. Оценка импульсной характеристики канала акустического трансформатора 211
Комаров И. И., Парамонов А. И. Миграция сервисов в сетях IoT с использованием Edge- и Fog-подходов 217

Корнюшкин Д. А., Крылов А. А. Использование протокола обнаружения сетевых сбоев между двумя маршрутизаторами в многоуровневой системе контроля с применением искусственного интеллекта 222
Корнюшкин Д. А., Крылов А. А. Использование протокола резервирования связи в многоуровневой системе контроля с применением искусственного интеллекта 226
Коротин В. Е. Дидактические условия преподавания технологий V2X 231
Коротин В. Е., Фам Б. В. Исследование технологий обеспечения низкой задержки в приложениях для беспилотных автомобилей 237
Косов П. В., Лабковская Р. Я. Применение нейросетевых технологий в анализе больших данных 244
Кравец Е. В, Пигарев Н. Д. Использование MATLAB RF Blockset в задаче цифрового моделирования предискажения усилителей мощности для систем 5G/6G 249
Крюкова Е. С., Паращук И. Б., Цыпнятов В. Б. Интеллектуальная обработка цифрового контента для эффективного обнаружения нежелательной информации в инфокоммуникационных системах уровня корпоративной электронной библиотеки 255
Маколкина М. А., Михайлов В. Д. Применение методов глубокого обучения с подкреплением Deep Reinforcement Learning для автономного управления QoS в самоорганизующихся сетях 261
Маслова А. А., Юркин Ю. В. Мобильные телекоммуникационные системы на железнодорожном транспорте РФ 268
Медведев В. А. Модели бинарной последовательности. Развитие понятий 275
Мещеряков Д. Е., Фокин Г. А. Экспериментальная оценка точности спутникового позиционирования GNSS RTK в условиях искусственных помех 279
Нгуен С. Н., Парамонов А. И. Оптимальный выбор схем модуляции и кодирования (MCS) при сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC) 285
Павловская А. А., Павловский М. В., Фёдоров С. Л. Методы слияния данных с сенсоров видимого и инфракрасного диапазонов, установленных на беспилотном летательном аппарате 291
Павловская А. А., Павловский М. В., Фёдоров С. Л. Сквозной конвейер обработки видео с БПЛА для мониторинга транспорта 297
Пелин А. А., Савищенко Н. В. Пропускная способность релеевского и райсовского MIMO–каналов 302
Прасолов А. А., Шамсиев Б. Г. Разработка цифровой схемы управления ключевыми формирователями гармонических колебаний 311
Рютин К. Е., Фокин Г. А. Позиционирование устройств в сетях 5G NR с использованием сигналов PRS 316
Рябиков Д. С., Стариков В. В. Моделирование процедуры сканирования лучей в сетях 5G NR 322
Синильников А. М. Современные тенденции развития спутниковой связи 328
Стариков В. В. Выбор среды моделирования для лабораторного практикума по планированию сетей 5G и 6G 334
Стариков В. В., Тишков А. О. Анализ бюджета канала спутниковой связи с использованием приложения Satellite Link Budget Analyzer 340
Сторожук Н. Л. Синхронизируемая по расписанию сеть Ethernet 346
Татаренков Д. А. Разработка курса по изучению многоуровневых генеративных трансформерных нейронных сетей в рамках подготовки специалистов телевизионного производства 354
Татаренков Д. А. Синтез виртуальных ракурсов с применением адаптивного обнаружения переднеплановых окклюзий 358

Тучкевич А. Н., Фёдоров С. Л. Обнаружение объектов в системах потоковой передачи и обработки видеоданных 364
Фёдоров А. В. Правила обмена ресурсами между телекоммуникационными сетями в условиях неординарных событий 368
Фокин Г. А., Шеремет Н. В. Экспериментальная апробация алгоритма Music для оценки угла прихода сигнала на SDR-демонстраторе технологии диаграммообразования 375

Радиоэлектронные системы и робототехника 381

Авдяков В. А. К вопросу обнаружения сигнала, принимаемого от зависающих летательных аппаратов в условиях применения помех 381
Авраменко В. С. Применение технологий машинного обучения для мониторинга окружающей среды беспилотными летательными аппаратами 386
Агейчик Н. О., Глушанков Е. И. Сравнительный анализ адаптивных алгоритмов фильтрации в антенных решетках при воздействии разнородных помех 390
Адонин Л. С., Ефименко В. В. Принцип работы потенциостата для быстрой сканирующей циклической вольтамперометрии и потребность в автономном устройстве 396
Акимов С. В., Верхова Г. В. Методологические основы формирования единого киберфизического пространства 403
Алли Р. А., Коровин К. О. Модель и алгоритмы микродопплеровской радиолокации БПЛА в городской среде для систем 5G NR 408
Антропов М. В., Владыко А. Г., Долгополов А. Л., Усс В. С. Проблемы проектирования систем совмещенной радиолокации и связи (ISAC) в мультиагентных робототехнических системах с использованием нейронных сетей с глубоким обучением 414
Арсирий А. И., Рыжикова Т. А. Обзор успешных применений искусственного интеллекта при расчете основных параметров кристаллических решеток 419
Белоус К. В., Пиликина Е. А., Шабанов А. П. Суперприложения: Перспективы и развитие 427
Борисов М. Г., Коровин К. О. Анализ вариантов построения мобильных антенн ДВ диапазона 432
Борисов С. В., Ланда А. Э., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Учебный практикум по физическим основам электроники: от существующего к возможному 438
Борисов С. В., Ланда А. Э., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д., Шумаков П. П. Создание условий для деятельностного освоения в образовательном процессе физического подхода к проектированию элементов электроники и фотоники 445
Буснюк А. О., Зайцев Д. А., Кузенов С. Р., Лившиц А. И., Передистов Е. Ю. Осаждение неметаллических примесей на входной поверхности сверхпроницаемой мембраны 452
Верхова Г. В., Летучий В. А. Анализ методов формирования метрологических киберфизических систем 457
Верхова Г. В., Суетин А. Ю. Агентный подход для обеспечения семантической интероперабельности в децентрализованных киберсредах 463
Верхова Г. В., Чернышов А. С. Разработка и исследование агентной системы для автоматизации построения туристических маршрутов на основании больших языковых моделей 468

Владыко А. Г., Плотников П. В., Тамбовцев Г. И. Предиктивное управление мобильной вычислительной инфраструктурой V2X на основе обучения с подкреплением 473
Волостных В. А., Воробьев П. В., Ткачев Д. Ф. Анализ динамики изменений геомагнитных возмущений за 2024 – 2025 радиогоды 480
Волынкин П. А. Моделирование частотных портретов для графических объектов 486
Ву З. Т., Глушаноков Е. И., Фам К. К. Оценка эффективности полярных кодов в зависимости от параметров конфигурации 491
Ву З. Т., Глушанков Е. И., Фам К. К. Снижение вычислительной сложности линейного предкодирования в системах MU-MIMO с использованием глубокого обучения 497
Галузов Е. В., Гольдибаев К. В., Рылов Е. А., Сорокин А. В. Анализ эффективности комбинированных методов расширения спектра 503
Глушанков Е. И., Митянин С. А. Реализация адаптивного фильтра Калмана с нечеткой логикой для оценки канала с К-распределением замираний на ПЛИС 510
Глушанков Е. И., Хренов А. А. Реализация метода обнаружения сигналов на основе анализа корреляционных матриц входных воздействий 515
Горобцов И. А. Проектирование системы совместной обработки сигналов ПВОС И ПРП 520
Деркач А. Е., Лиманцева Е. В., Чуднов А. М. Повышение своевременности обмена данными группы бпла на основе использования механизмов искусственного интеллекта для мониторинга состояния сети связи 525
Деткова В. М., Шарихина Ю. В. Апробация методических указаний для выполнения лабораторной работы «Оптико-электронные устройства» в учебном процессе. 535
Деткова В. М., Шарихина Ю. В. Моделирование свойств наноструктур с помощью программы mathcad в рамках изучения дисциплины «Наноэлектроника» 541
Дмитриков В. Ф., Зайцева З. В., Мельников П. С. Анализ ключевого усилителя мощности модуляционного типа с учетом фильтра источника питания 547
Дмитриков В. Ф., Зайцева З. В., Мельников П. С. Анализ устойчивости в «малом» импульсных преобразователей с учетом фильтра источника питания, являющихся замкнутыми нестационарными системами с внутренней ООС 554
Дмитриков В. Ф., Кучерявый А. И., Мельников П. С., Ухов А. А. Оптимизация динамических процессов в полумостовых схемах: сравнительный анализ и выбор снабберных цепей 561
Долматова О. А. Использование ИИ для созданияпрактико-ориентированных задач по теме «Основы квантовой механики» для инженерных специальностей 567
Зайцева З. В. Создание электронного курса по дисциплине «Теория электрических цепей»: от содержания к цифровой реализации 572
Коровин К. О., Межевов П. А. Использование компенсационного метода защиты от помех на БПЛА с переключаемой антенной решеткой 577
Коровин К. О., Фёдоров С. И. Расчет и моделирование спиральной антенны с широкополосным излучателем для диапазона UWB в России 582
Кубалова А. Р. Синтез гребенчатого эллиптического фильтра с сосредоточенными емкостями 587
Кучерявый А. И., Ухов А. А. Поэтапное подавление помех в полумостовых драйверах при работе с индуктивной нагрузкой 593
Ликонцев А. Н., Уроков А. Д. Анализ вариантов построения каналов управления и передачи данных с БПЛА 598

Любимов А. Г. Программно-конфигурируемые сети на основе инвариантных структур 603
Макаров Л. М. Байтстримерный нейронный процессор 610
Мохова А. А. Адаптивная локальная навигация для прямолинейно движущегося объекта 616
Никитин Ю. А. Сравнительное моделирование усилительных каскадов 621
Ниязгулыева А. М., Сейитнепесов Ч. Особенности внедрения технологии мобильной связи 5G в Туркменистане 626
Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Физическая картина необратимых процессов в аморфных диэлектрических оксидах тантала и ниобия 630
Павлов Ф. Ф., Федюшин В. Б. Учет неоднородности гравитационного поля земли в задаче о свободном падении тела с большой высоты 637
Сейитнепесов Ч., Уссаев Б. Г. Особенности распространения сигналов в радиоканалах сотовых систем связи в прибрежных районах 644
Усс В. С., Хоанг В. Т. Анализ методов защиты каналов управления и связи роботизированных платформ транспортной логистики от воздействия промышленных помех 649
Чебыкин В. А. Программная реализация трехмерной параметрической модели винта Архимеда 655

661

Информационные технологии и программная инженерия

Бердыева О. П. Информационные технологии в современном мире 661
Березкин А. А. Методика обоснования требований к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица 664
Березкин А. А., Ченский А. А. Исследование применимости кодека DCVC-RT для сжатия видеопотока на различных GPU 670
Березкин А. А., Ченский А. А. Исследование применимости метрики LPIPS для оценки качества кодирования нейросетевыми видеокодеками 677
Бондаренко И. Б., Параничев А. В. Программирование режимов управление транспортными потоками на перекрестке средствами ANYLOGIC 684
Бритаева О. М., Плотников П. В. Подходы к оценке вероятности банкротства предприятия на основе математического моделирования 690
Бритаева О. Х., Подгорная Е. А. Численные методы оценки регионального уровня жизни в России в 2020–2025 годах на примере Ленинградской области 696
Вивчарь Р. М., Григорьев Е. А., Пачин А. В. Некоторые аспекты моделирования систем интернета дронов 702
Волошинов Д. В., Мельников М. В. Оценка восприятия и понимания данных, представленных с помощью инфографики в среде виртуальной реальности 710
Гвоздков И. В., Ликарь А. И., Перевозник Ю. Я. Адаптация средств виртуализации в учебном процессе 716
Губин А. Н., Литвинов В. Л., Филиппов Ф. В. Исследование современных архитектур RAG-систем 722
Губин А. Н., Литвинов В. Л., Филиппов Ф. В. Оценка уровня подготовки студентов по результатам тестирования с использованием четырехпараметрической модели системы оценивания 729
Гунина Е. В., Орлов В. В. О проблемах преподавания инженерной и компьютерной графики студентам с низким уровнем предварительной подготовки 735
Денисова Ю. В. Интеграция QA И QC в образовательный процесс подготовки разработчиков ПО для повышения культуры качества в учебных проектах 740

Денисова Ю. В. Модель селективного внедрения искусственного интеллекта в жизненный цикл разработки программного обеспечения 745
Денисова Ю. В. Применение принципов ITIL 4 для оптимизации процессов ИТ-поддержки в ВУЗе 751
Долгая Н. А., Мусаева Т. В. Анализ требований к разработке сайта образовательной организации 758
Долгая Н. А., Мусаева Т. В. Методы и критерии оценки веб-контента образовательной организации 764
Ермакова Т. В., Коробов С. А. Особенности разработки классов на языке C++, связанных различными видами отношений 769
Ермакова Т. В., Коробов С. А. Современные методы организации учебного процесса в высшем учебном заведении в условиях санкционных ограничений 773
Киселева А. В., Петрова Е. Д. Особенности методики преподавания численных математических методов в университетах Телекоммуникаций с фокусом на задачи кибербезопасности и автономных систем 781
Козлова О. А., Матюхина Т. В., Раковский О. В. Применение искусственного интеллекта для автоматизации разработки программного обеспечения 787
Косов П. В., Лабковская Р. Я. Сравнительный анализ Python и R в задачах обработки и анализа больших данных 792
Куфельд А. С., Шиян А. А. Геймификация процесса подачи заявления на повышенную государственную академическую стипендию 800
Литвинов В. Л., Филиппов Ф. В. Оценка влияния шума на формирование запутанных квантовых состояний 803
Медведев С. А. Использование циркумскрипции в минималистичных аксиоматизациях логики первого порядка 810
Мельников М. В. Проектирование интерактивного голографического индикатора на основе микроконтроллера 816
Мошак Н. Н., Эль Сабаяр Шевченко Н. Актуальные подходы поддержки сервисов URLLC в сетях 5G 821
Смородин Г. Н. Управление портфелем студенческих проектов НА основе Google Sheets 826

Кибербезопасность 830

Авраменко В. С. Подход к упреждающему контролю защищенности информации в инфокоммуникационных системах 830
Авраменко В. С., Цыпнятов В. Б. Проблемные вопросы управления компьютерными инцидентами в инфокоммуникационных системах 835
Васичкин С. С., Красов А. В. Идентификация устройств в проводных линиях связи на основе активного параметрического зондирования 839
Виткова Л. А., Едемская Е. Д. Формализация критериев бизнес-критичности инцидента ИБ 845
Волостных В. А., Задбоев В. А., Шевченко А. А. Анализ изменений требований законодательства российской федерации о защите информации, не содержащей сведений, составляющих государственную тайну в государственных информационных системах 851
Гвоздков И. В., Ликарь А. И. Перевозник Ю. Я. Постквантовая криптография. Стандарт механизма инкапсуляции ключей на основе модульной решетки и квазициклических кодов 857
Гилавоги М., Красов А. В. Исследование устойчивости скрытого вложения методами цифровой стеганографии в исполнимый код к последующим процессам компоновки и оптимизации 864

Демидов Н. А. Некоторые аспекты исследований в сфере защиты облачных вычислений 870
Зикратов И. А., Зикратова Т. В. Метод обнаружения трех видов атак на рой роботов в задаче коллективного восприятия 875
Иванов Д. В., Налимов К. Г. Адаптивная архитектура системы кибербезопасности для противодействия уникальным угрозам искусственного интеллекта 881
Ильин Я. А., Сахаров Д. В. Исследование беспроводных технологий для обеспечения безопасности управления и настройки IoT 887
Киселев Н. Н. Применение алгоритма расчета по неявной схеме вычисления для формирования оценки защищенности объекта КИИ 892
Коржик В. И., Лапшин А. С., Яковлев В. А. Исследование эффективности матричного протокола распределения ключей с совмещенной процедурой преимущественного улучшения каналов 900
Космачев А. А., Котенко И. В. Подходы к тестированию на проникновение с использованием искусственного интеллекта 908
Котенко И. В., Фам Х. Х. Оценка уязвимостей протокола взаимодействия интеллектуальных агентов Agent-to-Agent (A2A) 914
Красов А. В., Салита А. С. Выявление злоумышленника в сети предприятия на основе сетевого трафика 920
Куцев Е. В. (КГТУ) Генеративно-состязательные сети как инструмент синтеза вредоносного сетевого трафика: анализ угроз и подходов к детектированию 926
Кушнир Д. В. Особенности управления ключами и применения цифровой подписи в решениях на основе блокчейна 931
Кюнер А. П., Чечулин А. А. Проблемы применения технологий искусственного интеллекта для противодействия социальной инженерии 937
Липатников В. А., Мелехов К. В., Макаренко Д. В. Способ сетевого контроля объектов критической информационной инфраструктуры от кибератак на основе генеративно-состязательной сети 942
Панков А. В. Алгоритм поиска атак в зашифрованном трафике в режиме реального времени 948
Саенко И. Б., Сажина А. В. Сравнительный анализ методов машинного обучения для обнаружения аномального поведения пользователей на основе системных логов 952
Скорых М. А. Методика обнаружения каналов управления вредоносного программного обеспечения в сетевом трафике при помощи статистических параметров 959
Соколов И. В. Методический подход к измерению зрелости процессов пентеста в системе менеджмента информационной безопасности 965
Сахаров Д. В., Спиридонов Д. П. Исследование методик выявления кибератак на облачные сервисы 971
Шариков П. И. Исследование возможности вложения цифрового водяного знака в модели искусственного интеллекта 976

Социальные технологии и экономика данных 981
Абрамян Г. В. Технологии и средства построения и функционирования гибридных цифровых экосистем на основе генеративного искусственного интеллекта 981
Абрамян Г. В., Атаян А. М. Анализ международных индексов цифрового развития 987

Абрамян Г. В., Атаян А. М. Особенности построения инфокоммуникационного жизненного пространства на основе генеративного искусственного интеллекта в условиях цифровой трансформации экономики и бизнеса 993
Абрамян Г. В., Катасонова Г. Р. Нейросети в создании рекламных креативов: риски и ограничения 999
Алексеенко И. А. Развитие российско-китайских бизнес-коммуникаций на основе аксиологического подхода 1004
Андреева Т. А. Цифровая зрелость и корпоративная устойчивость 1010
Бабин Н. Н., Панихидников С. А. Некоторые аспекты воздействия человека на окружающую среду 1014
Булатова А. Б. Чат-боты и семантический поиск: интеграция инструментов Web 3.0 в преподавание иностранных языков 1020
Волчик О. В., Макаров В. В. Управление качеством природоподобных технологий 1026
Вольфсон М. Б. Эволюция поисковой оптимизации: от SEO к GEO 1032
Вязьмин А. Ю. О «собственном выборе» в поступке согласно Аристотелю 1038
Гехт А. Б., Потаенкова К. Ю. Видеонаблюдение и биометрические технологии как факторы трансформации ценностей российского общества в XXI веке 1044
Гехт А. Б., Потаенкова К. Ю. Социальные сети как фактор трансформации ценностей российского общества в XXI веке 1049
Греков К. Б. Цифровой двойник в экологии и природопользовании 1054
Егорова М. А., Смирнова В. С. Интеграция AI-продуктов в «серебряную» экономику 1059
Завалишин А. Ю. Постинформационное общество: миф или новая реальность? 1065
Исаков А. В., Павлова Е. В. Трансформация цифровой экономики в экономику данных: особенности институционального и отраслевого развития в российском ИКТ-секторе 1071
Калимуллина О. В. Цифровые платформы как основа трансформации конкурентной среды и существующих бизнес-моделей 1077
Катасонова Г. Р., Сотников А. Д. Моделирование информационных потоков в системе управления образованием 1081
Кваша Н. В. Данные как новый вид экономических ресурсов 1085
Кваша Н. В., Макаров В. В., Слуцкий М. Г. Модель технопредпринимательского инжиниринга как инструмент интеграции образования, науки и индустрии инфокоммуникаций 1090
Кобильняк А. А., Неровный А. В. Регуляторные инновации и смертность от передозировок в США: естественный эксперимент 2024–2025 гг. 1097
Кузьмина А. В., Ткачева Е. В., Федорова О. М. Цитирование как стимулирующий прием в организации дискуссий на предтекстовом этапе работы с текстом 1102
Лутовинова Е. Ю. Ключевые аспекты применения технологий искусственного интеллекта в системах управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) 1110
Манвелова Н. Е. Рекуперация соединений алюминия из осадков реагентной дефосфотизации сточных вод 1117
Мешков А. В., Симонина А. А. Шеринговая экономика как трансформация института собственности и модели потребления в цифровом обществе 1122
Никифорова С. А., Федорова А. В. Перспективы экономического развития вуза в условиях реформирования системы образования 1128
Носенко А. А., Посохова О. А. Шеринговая экономика в условиях цифровой трансформации 1133
Пучков Д. Б. Искусство в информационном обществе 1140

Стурман В. И. Географическая корректность картографирования электромагнитных полей 1145
Федоренко И. Н. Профессиональный портрет специалиста в области информационно-коммуникационных технологий для отраслей экономики 1149
Хитрин С. И., Хитрина И. Ю. Геймификация и игровые технологии в обучении дисциплинам гуманитарного цикла 1156
Шилков В. И. Цифровая трансформация и управление информационно-экономической безопасностью предприятий водоснабжения и водоотведения 1163
Щербаков И. Б. Цифровая экономика и криптовалюты: их роль, перспективы и риски 1170
Щетинина Д. А. Развитие медиакомпетентности студентов коммуникационных специальностей в алгоритмической медиасреде 1174
Ююкина Т. И. Экосистемный подход Китая в развитии промышленных инноваций 1180

Сети связи специального назначения 1186
Александров В. А., Сагдеев А. К. Методы повышения надежности передачи команд управления в системах управления беспилотными аппаратами 1186
Васильев Д. Н., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С. Методы повышения защищенности информационно-телекоммуникационной сети военного назначения от технической разведки 1192
Гордийчук Р. В., Лубянников А. А., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С. Организационно-технические методы повышения защищенности системы радиосвязи от радиоэлектронного подавления 1198
Ермаков А. В. Особенности функционирования защищенного сегмента телекоммуникационной системы высокотехнологичной компании 1202
Загорельский В. В., Марченков А. А., Нарбеков Д. А. Применение интелектуального тестирования в системе военного образования 1207
Козырев В. М., Лашин Ю. Ф., Музыкантов А. Н., Сагдеев А. К. Военный учебный центр как среда формирования гражданской идентичности и профессионального самоопределения молодежи 1212

Авторы статей 1218

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

УДК 004.7
ГРНТИ 49.37.29

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ СООБЩЕНИЙ

Н. И. Абрамова, П. В. Воробьев, М. З. Лящук

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье рассматривается система управления потоками сообщений сети передачи данных. В табличной форме приводится состав системы управления потоками сообщений и этапы цикла управления потоками сообщений, а также приводятся различные способы реализации регулирования потоков и методы сбора информации о состоянии элементов сети.

сеть передачи данных, система управления потоками сообщений, предназначение системы, способы реализации систем

Сеть передачи данных (СПД) находится под постоянным воздействием внешних факторов: потоки сообщений с постоянно изменяющимися интенсивностями, отказы элементов сети и помехи в каналах связи. Внешние воздействия не постоянны во времени и носят случайный характер. Выполнение требований к обмену информацией требует приспосабливать режимы работы сети к изменяющимся внешним воздействиям – это и составляет основу управления процессом регулирования потоков сообщений.

Совокупность технических средств, обеспечивающих выполнение управленческих функций, будем называть системой управления потоками сообщений (СУПС). Она объединяет объекты управления и управляющие объекты, между которыми осуществляется передача информации о состоянии сети и информации управления. Состав СУПС представлен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Состав системы управления потоками сообщений

№ п/п	Состав СУПС	Предназначение элементов
1	Объекты управления	Устройства, обеспечивающие на узлах коммутации (УК) распределение потоков сообщений в соответствии с адресами и таблицами маршрутов, а также контроль состояния элементов сети
2	Управляющие устройства	Устройства, осуществляющие сбор информации о характеристиках и состоянии элементов сети с формированием таблиц маршрутов
3	Информация о состоянии элементов сети	Сведения о текущем состоянии элементов сети: количество сообщений в очереди на УК, наличие и количество исправных каналов на линиях связи
4	Статистическая информация	Совокупность сведений о статистических характеристиках сети за некоторый промежуток функционирования сети: коэффициенты исправного действия элементов сети, вероятность ошибки в каналах связи, интенсивность потоков, поступающих в сеть
5	Информация управления	Команды на изменение таблиц маршрутов на УК (обычно эти команды содержат полную информацию о вновь сформированных таблицах маршрутов)

В наиболее полном варианте цикл управления процессом регулирования потоков сообщений включает следующие этапы:

– сбор информации о характеристиках состояния элементов сети и потоках сообщений;
– решение задачи формирования и упорядочения в соответствии с установленным отношением предпочтения множества маршрутов (построение таблицы маршрутов);
– передачу таблиц маршрутов в объекты управления узлов коммутации;
– перестройку алгоритмов распределения потоков сообщений в соответствии с новыми таблицами маршрутов и принятой процедурой.

Существует ряд различных способов реализации управления процессом регулирования потоков сообщений, которые будут рассмотрены в данной статье.

Статическое управление потоками сообщений

Статическое управление потоками сообщений состоит в изменении таблицы маршрутов по некоторому априорно заданному расписанию.

В частном случае, когда каждый узел сети использует таблицу маршрутов, сформированную при проектировании сети. Такой вариант приемлем в сетях с высоконадежными компонентами и стабильными во времени интенсивностями потоков сообщений.

В общем случае статического управления используется несколько таблиц маршрутов для наиболее характерных ситуаций в сети и устанавливается расписание, в соответствии с которым та или иная таблица вводится в действие. При этом расписание составляется по результатам исследования законов изменения интенсивностей потоков сообщений.

При статическом управлении практически отсутствует необходимость в управляющих устройствах, так как варианты таблиц маршрутов заданы и хранятся на узлах коммутации вместе с программой расписания. В большинстве практических случаев внешние факторы, определяющие работу сети, изменяются не по детерминированным, а по случайным законам во времени, что затрудняет составление таблиц маршрутов. Использование в этих условиях неточного расписания или постоянных таблиц маршрутов может оказать отрицательное влияние на качество функционирования сети. Проиллюстрируем этот факт на примере сети с квазислучайной процедурой выбора маршрута (использование только маршрутов, указанных в таблице 1) [1, 2].

Пусть между двумя произвольными узлами коммутации существует четыре маршрута: S_1, S_2, S_3, S_4. При проектировании сети расчеты показали, что задержки сообщений при передаче по этим маршрутам равны:

$$t'_{s1} = 5; t'_{s2} = 15; t'_{s3} = 40; t'_{s4} = 40.$$

Пусть далее оказалось, что оптимальные значения вероятностей передачи сообщений по каждому из этих маршрутов

$$P_{s1} = 0{,}7;\ P_{s2} = 0{,}2;\ P_{s3} = 0{,}05;\ P_{s4} = 0{,}05.$$

Средняя задержка сообщений при таком оптимальном для данной ситуации распределения потока сообщений равна

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^{4} p_{si} t_{si} = 10{,}5.$$

Предположим, что через некоторый период времени эксплуатации характеристики сети и интенсивности потоков сообщений изменились таким образом, что реальные задержки в маршрутах стали

$$t'_{s1} = 40; t'_{s2} = 5; t'_{s3} = 15; t'_{s4} = 40.$$

Если при этом отношение предпочтения на множестве маршрутов, хранящихся в узле коммутации, не изменилось, значения маршрутов p_{si} остались неизменными, то средняя задержка в сети стала

$$\overline{t'} = \sum_{i=1}^{4} p_{si} t'_{si} = 31{,}5,$$

т.е. значительно возросла.

Если в данных условиях вообще не устанавливать отношения предпочтения на множестве маршрутов, ограничив его заданными четырьмя маршрутами, что соответствует заданию равных вероятностей передачи по каждому из маршрутов p_{si}=1/4, то $\bar{t}'' = 25 < \bar{t}'$. Таким образом, в случаях, когда ситуация в сети меняется случайным образом, на множестве маршрутов лучше вообще не устанавливать отношения предпочтения при статическом управлении.

Более целесообразным может оказаться использование чисто случайной процедуры.

Динамическое управление потоками

При динамическом управлении потоками сообщений реализуется систематическое возобновление цикла управления. В зависимости от способа выбора моментов возобновления циклов управления, можно выделить интервальное, групповое и индивидуальное динамическое управление.

При интервальном динамическом управлении циклы возобновляются через детерминированные интервалы времени, величина которых определяется в зависимости от темпа изменения состояния сети, при групповом управлении – после передачи определенного числа сообщений, а в случае индивидуального управления – при поступлении каждого очередного сообщения.

Индивидуальное динамическое управление потоками может реализовываться аккордно или пошагово. Аккордное управление предусматривает выполнение цикла управления для каждого сообщения один раз на узле-отправителе. При этом используется информация обо всех элементах сети и в заголовок сообщения заносится весь маршрут (номера промежуточных узлов) до узла-получателя. Аккордному управлению сопутствует маршрутный метод адресования (адрес содержит номера всех промежуточных узлов прохождения сообщения до узла-получателя) и использование на узлах коммутации аккордных таблиц маршрутов.

Если период изменения состояния сети соизмерим со временем пребывания в ней сообщения, аккордное управление может привести к ухудшению внешних характеристик сети.

При шаговом или ступенчатом управлении цикл управления возобновляется на каждом промежуточном узле. Шаговое управление применяется в случаях, когда периоды между изменениями ситуации в сети соизмеримы с временем прохождения сообщений. При использовании этого варианта управления значительно возрастает объем служебной информации, передаваемой в сети (информация состояния и информация управления). Важным вопросом при обеспечении динамического управления потоками является передача служебной информации, особенно информации о состоянии элементов сети.

Методы сбора информации о состоянии сети

1. Сбор информации по специальной сети отображения.

На сети образуется специальная подсеть, состоящая из специально выделенных каналов, предназначенных только для передачи служебной информации. Данный метод позволяет осуществлять сбор как собственно информации о мгновенных ситуациях, так и статистической информации об элементах сети. Недостатком его является неэкономичность, так как постоянно задействованные каналы используются только эпизодически.

2. Использование служебных сообщений. В этом случае каждый узел через определенный интервал времени при изменении ситуации генерирует и циркулярно рассылает специальные сообщения, в которых содержится информация о линиях, инцидентных данному узлу, а также об их нагрузке.

3. Использование информационных сообщений.

В составе служебной части каждого информационного сообщения может быть предусмотрено место, в которое заносится информация о состоянии и характеристиках тех участков сети, через которые проходит сообщение. По мере прохождения по сети эта информация считывается и пополняется в узлах, входящих в маршрут.

4. Использование зонд-сообщения.

При решении задачи формирования таблицы маршрутов из узла-отправителя во все инцидентные линии связи посылается короткое зонд-сообщение. Этот зонд транслируется в инцидентные линии связи на всех последующих узлах, на каждом из которых запоминается номер линии связи, по которой поступило зонд-сообщение. При достижении зондом узла-получателя

последний формирует отраженный зонд, который передается по запомненным при передаче прямого зонда линиям связи. Число отраженных зонд-сообщений будет равно числу маршрутов между двумя узлами.

Отношение предпочтения на множестве маршрутов устанавливается в соответствии с очередностью возвращения экземпляров зонд-сообщения. Чем меньше задержка зонд-сообщения, тем большее предпочтение получает маршрут, по которому он пришел.

Можно констатировать, что при использовании зонд-сообщения методика сбора информации о состоянии сети и формирования таблицы маршрутов реализуется путем натурного испытания (эксперимента).

Список используемых источников

1. Малиновский С. Т. Сети и системы передачи дискретной информации и АСУ: Учебник для электротехнических институтов связи. М.: Связь, 1979. 384 с. С. 336-339.

2. Мизин И. А., Богатырев В. А., Кулешов А. П. Сети коммутации пакетов. Под ред. В. С. Семенихина. М.: Радио и связь, 1986. 408 с. С. 309-312, 323-338.

MANAGEMENT OF THE PROCESS OF REGULATING MESSAGE FLOWS

Abramova N., Vorobyov P., Lyashchuk M.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

The article discusses the system of managing message flows in a data transmission network. The table shows the composition of the message flow management system and the stages of the message flow management cycle, as well as various methods of implementing flow regulation and methods of collecting information about the state of network elements.

Key words: data transmission network, message flow management system, purpose of the system, methods of implementing systems

УДК 621.396
ГРНТИ 49.01.11

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА СЕТЕЙ 5G В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Н. И. Абрамова, В. А. Задбоев, В. С. Сарафанников

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье рассматриваются особенности распространения радиосигнала сетей пятого поколения в *условиях плотной городской застройки. Анализируются физические механизмы затухания, отражения, дифракции* и *рассеяния электромагнитных волн* в *диапазонах sub-6 ГГц* и *миллиметровых волн. Особое внимание уделяется количественной оценке потерь* на *распространение* и *влиянию морфологии городской среды* на *параметры канала связи. Приведены расчетные примеры, демонстрирующие характер деградации сигнала при увеличении частоты* и *расстояния.*

5G, миллиметровые волны, затухание сигнала, городская среда, радиопланирование, beamforming

Введение

Технология 5G характеризуется использованием широкого спектра частот – от диапазонов ниже 6 ГГц до миллиметровых волн порядка 24–40 ГГц. В условиях городской среды это приводит к существенному изменению характера распространения сигнала по сравнению с системами предыдущего поколения, такими как 4G [1].

Городская застройка формирует сложную многолучевую структуру канала. Наличие отражающих поверхностей, узких улиц и перемещающихся объектов приводит к интерференционным замираниям и быстрому изменению амплитудно-фазовых характеристик сигнала [2].

Базовой моделью для первичного анализа является формула (1) потерь в свободном пространстве (FSPL):

$$L_{fs}(dB) = 32{,}44 + 20\,log_{10}(f) + 20\,log_{10}(d), \quad (1)$$

где f – частота в МГц, d – расстояние в км.

Рассмотрим два характерных случая при частоте 3,5 ГГц (sub-6 ГГц) (2) и 28 ГГц (миллиметровый диапазон) (3).

Пусть расстояние между базовой станцией и абонентом составляет 200 м (0,2 км).

Для 3,5 ГГц:

$$L_{fs} = 32{,}44 + 20\,log_{10}(3500) + 20\,log_{10}(0{,}2) \approx 89{,}34 \text{ дБ}, \quad (2)$$

Для 28 ГГц:

$$L_{fs} = 32{,}44 + 20\,log_{10}(28000) + 20\,log_{10}(0{,}2) \approx 107{,}4 \text{ дБ}, \quad (3)$$

Разница составляет приблизительно 18 дБ, что эквивалентно уменьшению мощности принимаемого сигнала более чем в 60 раз при прочих равных условиях. Данный расчет иллюстрирует фундаментальное увеличение потерь при переходе к миллиметровым волнам [3].

В реальной городской среде потери превышают значения свободного пространства. Для аппроксимации используется логарифмическая модель (4):

$$L(d) = L_0 + 10n \log_{10}(\frac{d}{d_0}), \quad (4)$$

где n – показатель степени затухания, принимающий значения 2,7–4,0 для плотной застройки.

Пусть n = 3,7, d_0 = 50 м, а L_0 = 80 дБ при 50 м для частоты 3,5 ГГц. Тогда на расстоянии 200 м получается примерно 102,3 дБ [4].

Полученное значение на 13 дБ превышает расчет для свободного пространства, что отражает влияние отражений и экранирования зданиями.

В условиях «уличных каньонов» распространение сигнала приобретает квазидвумерный характер: энергия преимущественно распространяется вдоль улицы. При этом затухание поперек кварталов возрастает, особенно на частотах выше 20 ГГц.

Дополнительные потери вносят стеклянные фасады с металлическим напылением (до 20–30 дБ при проникновении внутрь здания), а также транспортные средства, создающие кратковременные замирания глубиной до 15 дБ.

Для компенсации этих эффектов используются антенные решетки с формированием узконаправленных лучей. При коэффициенте усиления антенны 18–24 дБ частично компенсируется увеличение свободных потерь, что позволяет поддерживать требуемый уровень принимаемой мощности.

В формуле (5) рассмотрен упрощенный баланс мощности для частоты 28 ГГц на расстоянии 200 м [5].

Пусть мощность передатчика 30 дБм, усиление антенн передатчика и приемника по 20 дБ, суммарные потери на распространение 110 дБ, тогда принимаемая мощность:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L = -40 \text{ дБм}, \quad (5)$$

При чувствительности приемника порядка −90 дБм энергетический запас составляет около 50 дБ, что является достаточным для устойчивой передачи при отсутствии глубоких замираний. Однако при дополнительном экранировании или неблагоприятной ориентации терминала запас может существенно сокращаться.

Заключение

Проведенный анализ подтверждает, что в городской среде распространение сигнала 5G определяется не только частотными характеристиками, но и морфологией застройки. Расчетные примеры демонстрируют значительный рост потерь при переходе к миллиметровым диапазонам и увеличении расстояния.

Следовательно, проектирование городских сетей 5G требует плотного размещения базовых станций, применения адаптивных антенных систем и детализированного радиопланирования с учетом конкретной геометрии городской среды. Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение эмпирических коэффициентов моделей и разработку методов оперативной адаптации к динамике городской среды.

Список используемых источников

1. Задбоев В. А., Каялайнен В. Е., Могилатов В. В. Исследование безопасности протокола MQTT для передачи данных в иммерсивных системах и сетях связи 6G // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. СПб междунар. конф. и XIV СПб межрегион. конф., Санкт-Петербург, 29–31 октяб. 2025 г. СПб: Региональная общественная организация «Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления», 2025. С. 133-136. EDN: PAUCFM.

2. Аветиков А. А., Задбоев В. А., Тимофеев А М. Основные уязвимости 5G/6G и их различия // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. СПб междунар. конф. и XIV СПб межрегион. конф., Санкт-Петербург, 29–31 октяб. 2025 г. СПб: Региональная общественная организация «Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления», 2025. С. 38-39. EDN: ZYEMZO.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683797 Российская Федерация. Программа для расчета потерь сигнала стандарта 4G на трассе без прямой видимости по модели 3GPP TR 36.873: заявл. 01.09.2025: опубл. 08.09.2025 / П. А. Берестовский, П. В. Воробьев, В. А. Задбоев. EDN: XMZODH.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685426 Российская Федерация. Программа для расчета потерь сигнала стандарта 5G на трассе с вероятностью прямой видимости по модели 3GPP TR 38.901: заявл. 01.09.2025: опубл. 23.09.2025 / П. А. Берестовский, П. В. Воробьев, В. А. Задбоев. EDN: IMRRUL.

5. Изотов Д. Ю., Задбоев В А., Шевяков В. Д., Садовников В. Е. Анализ проблем развития технологий блокчейн для обеспечения информационной безопасности в России // Современные тенденции развития фундаментальных и прикладных наук: материалы VIII Всероссийс. науч. практ. конф., Брянск, 25 января 2025 г. Б: БГИТУ, 2025. С. 532-536. EDN: GSARHE.

Статья представлена доцентом кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, кандидатом технических наук Шевченко А. А.

ANALYSIS OF 5G NETWORK SIGNAL PROPAGATION IN URBAN ENVIRONMENTS

Abramova N., Zadboev V., Sarafannikov V.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

This article examines the characteristics of fifth-generation radio signal propagation in dense urban environments. It analyzes the physical mechanisms of attenuation, reflection, diffraction, and scattering of electromagnetic waves in the sub-6 GHz and millimeter-wave bands. Particular attention is paid to quantifying propagation losses and the impact of urban environment morphology on communication channel parameters. Calculation examples are provided demonstrating the nature of signal degradation with increasing frequency and distance.

Key words: 5G, millimeter waves, signal attenuation, urban environment, radio planning, beamforming

УДК 004.7
ГРНТИ 49.37.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАНДАРТИЗОВАННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ПРИ ГРУППОВОМ ПРИМЕНЕНИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗЛИЧНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Н. И. Абрамова, М. З. Лящук

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье предложена стандартизация базовых интерфейсов взаимодействия робототехнических комплексов и их конструктивных средств группы роботов на основе распределения задач по уровням взаимодействия и специальных модулей программного сопряжения с иллюстрацией структурно-функциональных схем взаимодействия робототехнических платформ с различными видами базирования.

робототехника, группа роботов, робототехнический комплекс, робототехническое средство, уровень взаимодействия, базовый интерфейс

Основным направлением развития робототехники является создание комплексов, обеспечивающих возможность группового применения на базе различных платформ, стандартизованных каналов, протоколов управления и стандартизованных интерфейсов взаимодействия. Наличие большого числа разработчиков и их несогласованность в технических решениях может привести к проблемной ситуации в области группового применения робототехнических комплексов различных видов базирования.

Для определенности, под стандартным интерфейсом понимается совокупность унифицированных аппаратных, программных и конструктивных средств, для реализации взаимодействия различных функциональных элементов в системах сбора и обработки информации, направленных на обеспечение информационной, электрической и конструктивной совместимости указанных элементов.

Стандартизация и унификация уже сейчас являются проблемой для группового применения РТК, так как модули робота даже одного производителя не унифицированы между собой, что создает серьезные препятствия для их группового применения. Кроме того, перспективным является унификация и стандартизация различных интерфейсов и конструктивных

элементов. Проблемами группового применения РТК технического характера являются [1]:

– отсутствие интеллектуальных человеко-машинных интерфейсов и протоколов обмена данными для обеспечения внутригруппового взаимодействия РТК;
– отсутствие базовых интерфейсов управления группой РТК.

Целями стандартизации интерфейсов различных типов РТК по назначению и видам базирования является – обеспечение интеграции РТК различных типов и видов базирования в едином информационном пространстве для совместного решения задач.

Наиболее эффективные технические решения в процессе реализации предложенных способов стандартизации интерфейсов должны быть закреплены соответствующими стандартами. Проводимая стандартизация должна быть поэтапной, предусматривающей нормативно-правовую основу, которая обеспечивает как заказчикам, так и разработчикам определенный диапазон возможностей для активных и правомерных действий в интересах достижения целей, перечисленных выше. Так например, для эффективного группового применения РТК, в том числе комплексов с БПЛА, в сетецентрических системах управления в НАТО принят стандарт STANAG 4586 [2], позволяющий различным разработчикам создавать разнотипные беспилотные системы, которые коалиционные силы могут применять совместно, с обеспечением оперативного доступа к получаемым данным и управления режимами их получения. В частности, на сегодня только типоряд БПЛА, который предполагает данные технологии управления, включает практически все комплексы ближнего действия, малой и средней дальности.

Важной особенностью подхода к управлению группировками БПЛА с различными видами базирования является то, что для выполнения конкретной специальной задачи, решаемой в режиме распределенного (группового, совместного) управления, далеко не всегда требуется управление БПЛА в полном объеме. В ряде случаев требуется: получение информации от целевой нагрузки БПЛА в режиме реального времени; управление целевой нагрузкой; изменение маршрута движения БПЛА в ходе выполнения задачи, т.е. реализация различных уровней доступа (управления) БПЛА. Следовательно, для построения унифицированных средств группового управления РТК и их робототехнических средств (РТС) целесообразно ввести понятие «уровень взаимодействия», который определяет функциональные возможности средств группового управления РТК и РТС. В таблице 1 пока-

заны результаты декомпозиции типовых задач управления РТК (РТС) при их групповом применении и их распределение по уровням взаимодействия.

ТАБЛИЦА 1. Распределение задач управления РТК (РТС) по уровням взаимодействия

Уровень	Описание уровней	Решаемые задачи
1	Общие задачи планирования группового применения РТК (РТС)	Получение задачи от потребителя Централизованное планирование группового применения РТК (РТС) Передача результатов планирования на наземный пункт управления (НПУ) Уточнение плана применения РТК(РТС)
2	Прямой прием информации от датчиков РТК (РТС), включая целевую нагрузку (ЦН) с возможностью мониторинга и управления целевой нагрузкой	Прием телеметрической информации от каждого РТК (РТС) Прием видовой информации (по видам базирования) от РТК (РТС) Ретрансляция видовой информации от РТК (РТС) Комплексная обработка информации от каждого РТК (РТС) в режиме реального времени Передача управления ЦН. Управление ЦН.
3	Мониторинг статуса РТК (РТС) с возможностью управления движением (исключая этапы взлета и посадки БПЛА)	Передача управления РТК (РТС), в том числе БПЛА
4	Управление БПЛА в ходе взлета и посадки и контроль состояния БПЛА при выполнении этих процедур	Разработка полетного задания для БПЛА. Вывод БПЛА в район выполнения общей задачи Возвращение БПЛА после выполнения общей задачи. Мониторинг и управление целевой нагрузкой

Важно установить общие правила, позволяющие разнотипным РТК совместно функционировать для применения их в едином информационном пространстве. С этой целью предложена архитектура системы (рисунок 1), позволяющей сохранить специфику каждого РТК и вместе с тем обеспечить его интеграцию в системы более высокого уровня, в том числе и с целью совместного применения с другими РТК (на примере комплекса с БПЛА).

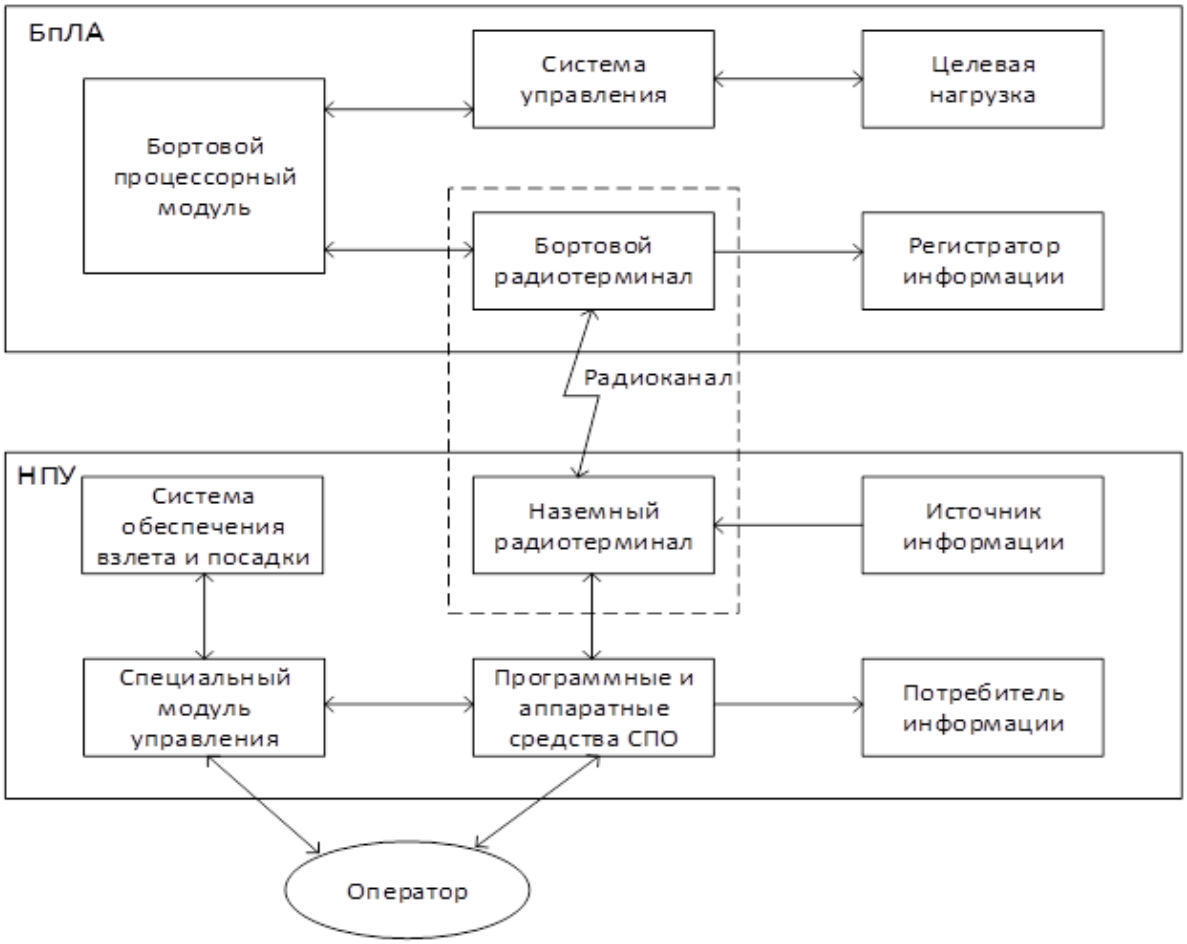


Рис. 1. Структурно-функциональная схема РТК, реализующая стандартные протоколы и интерфейсы взаимодействия (на примере комплекса с БПЛА)

Особенностями предлагаемой на рисунке 1 структуры комплекса являются:

– достаточно общий характер, исключающий необходимость радикального изменения состава и структуры РТК при его доработке для реализации стандартных интерфейсов взаимодействия,
– учет особенностей различных типов полезной нагрузки,
– возможности построения системы группового управления с использованием радиоканалов различных типов,
– разделение функционала наземного пункта управления (НПУ) между двумя подсистемами: специальным модулем управления (СМУ) и специализированным программным обеспечением (СПО). При этом СПО обеспечивает поддержку функций, предусмотренных соответствующим уровнем взаимодействия по базовым интерфейсам, а специализированный модуль управления позволяет эффективно управлять РТК в полном объеме, с учетом системы обеспечения взлета и посадки для БПЛА.

К базовым интерфейсам взаимодействия относятся:

– интерфейс взаимодействия с потребителем информации (ПИ), обеспечивающий взаимодействие средств управления с внешними источниками и потребителями информации, в том числе, по каналам автоматизированной системы управления (АСУ),
– интерфейс обмена видовой (по видам базирования) информацией, обеспечивающий поддержку функций приема потока видовых данных, получаемых РТК (РТС), преобразования потока данных в унифицированный формат, архивирования и представления потока видовой информации в унифицированном формате для дальнейшей визуализации и обработки,
– интерфейс управления РТК (РТС), обеспечивающий поддержку функций управления РТК (РТС) в соответствии с уровнями взаимодействия, которые установлены для определенного НПУ и соответствующего типа РТК (РТС),
– человеко-машинный интерфейс управления РТК (РТС), обеспечивающий оператора возможностями по взаимодействию с РТК (РТС) на заданном уровне взаимодействия.

Реализация базовых интерфейсов требует определения круга задач группового применения РТК (РТС), поскольку множество управляющих воздействий и содержание данных информационного обмена должны в полной мере соответствовать этим задачам. Для интеграции в систему РТК и их РТС различных производителей должна быть предусмотрена реализация базовых интерфейсов взаимодействия, основанных на применении стандартов архитектуры открытых систем, а при их отсутствии или необходимости конкретизации -- специализированных стандартов, разрабатываемых, в том числе, в соответствии с ГОСТ [3].

Для реализации необходимых функций управления РТК (РТС) различных типов программными средствами при их включении в группу создаются специализированные модули программного сопряжения (СМПС), обеспечивающие оперативное включение РТК (РТС) в группу взаимодействующих объектов без изменения программного обеспечения РТК (РТС). Типовая архитектура подключения РТК (РТС) различных типов и видов базирования к аппаратно-программному комплексу группового управления через СМПС представлена на рисунке 2, в котором ПАГУ – программно-аппаратный комплекс группового управления.

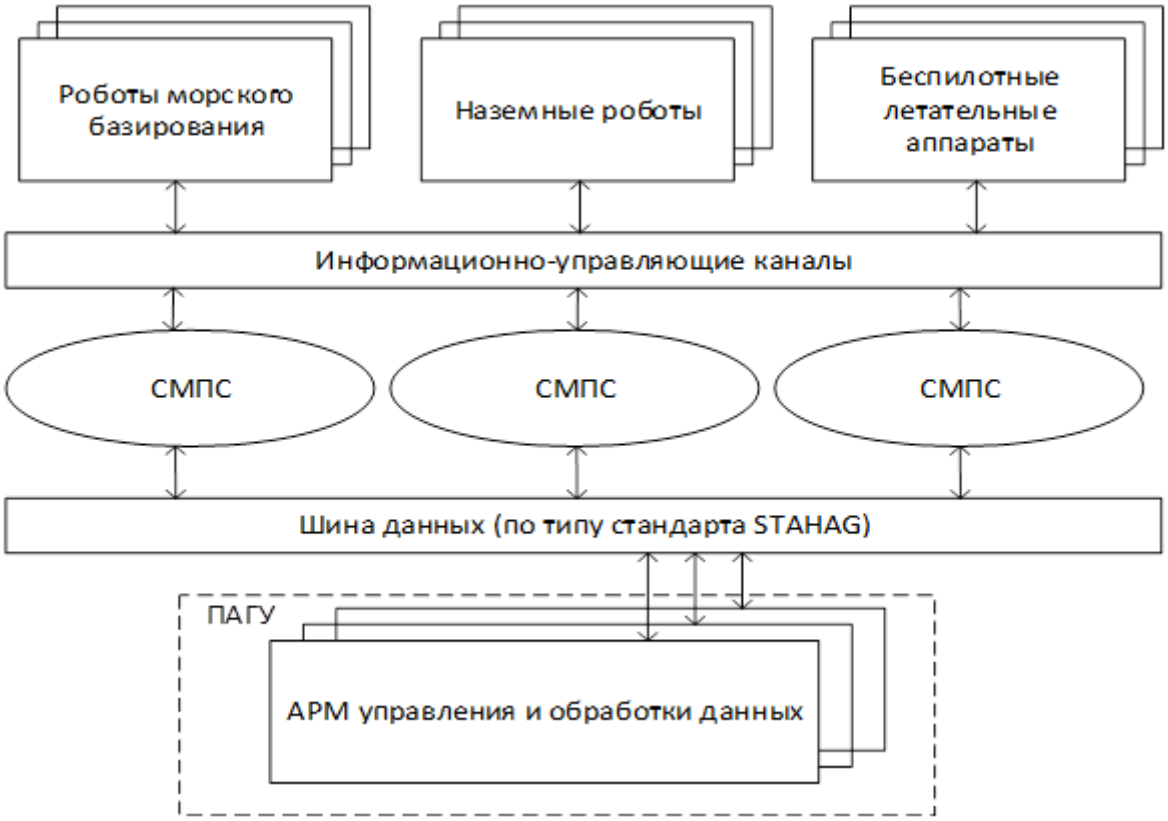


Рис. 2. Типовая архитектура подключения разнородных РТК (РТС) через специализированные модули программного сопряжения (СМПС)

Как показано на рисунке 2, унифицированные АРМ управления и обработки данных из состава ПАГУ осуществляют обмен необходимой информацией через общую шину данных, подключенную через модули сопряжения к специфическим информационно-управляющим радиоканалам РТК различных видов базирования. Такое решение позволяет включать в состав группы, решающей общую задачу, любые РТК (РТС) без изменения аппаратного и программного обеспечения, как самих РТК (РТС), так и их НПУ. Интерфейс взаимодействия с потребителем информации на данном рисунке не представлен, т. к. он определяется типом РТК (РТС), остальные базовые интерфейсы реализуются в СМПС и ПАГУ (требуется отдельное рассмотрение типов РТК (РТС) по уровням взаимодействия).

Успешное решение рассматриваемой в статье проблемы стандартизации интерфейсов взаимодействия при групповом применении разнородных РТК позволит перейти к практическому использованию рациональной модульной архитектуры робототехнических комплексов различных видов базирования, что будет способствовать расширению серийности функциональных модулей РТК взамен стремления каждого разработчика делать все самому.

Список используемых источников

1. Ефанов В. И., Мизин С. В., Неретина В. В. Управление полетом БПЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов // Вестник УГАТУ, 2014. № 1. С. 114-121.
2. STANAG 4586 (Edition 3) – Standard Interfaces of UAV Control System for NATO UAV Interoperability. NATO Standardization Agency. Brussels, Belgium, 2012.
3. ГОСТ РВ 0001-003-2015. Система стандартизации оборонной продукции. Разработка, принятие, обновление, отмена. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2016. 14 с.

USAGE OF STANDARDIZED INTERFACES IN GROUP USE OF ROBOTIC COMPLEXES OF VARIOUS BASES

Abramova N., Lyashchuk M.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

This article proposes standardizing basic interfaces for interaction between robotic systems and their robot group design elements based on the distribution of tasks across interaction levels and specialized software interface modules, illustrating structural and functional diagrams of interaction between robotic platforms with various bases.

Key words: robotics, robot group, robotic system, robotic element, interaction level, basic interface

УДК 621.396.7
ГРНТИ 49.01.01

РЕГУЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. В. Александров, Б. М. Антипин, Е. М. Виноградов, Е. В. Шаброва

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматриваются вопросы радиочастотного регулирования радиоэлектронных средств беспилотных авиационных систем для обеспечения их электромагнитной совместимости с другими радиоэлектронными средствами. Приводятся требования к средствам мониторинга использования радиочастотного ресурса мобильным и стационарным элементами беспилотных авиационных систем. Данные средства должны обеспечивать оценку параметров излучений радиотехнического оборудования как мобильного, так и стационарного элементов таких систем и определять их местоположение. Рассмотрены также некоторые вопросы, связанные с нормативным регулированием использования радиочастотного спектра средствами обнаружения и подавления беспилотных воздушных судов.

радиочастотное регулирование, беспилотные авиационные системы, радиоконтроль

Введение

Легитимность и безопасность полетов беспилотных воздушных судов (БВС) должны обеспечиваться выполнением требований нормативных документов, регламентирующих условия их применения и определяющих значения параметров излучений радиоэлектронных средств (РЭС) беспилотных авиационных систем (БАС), размещаемых на БВС и на пульте управления (ПУ). В связи с этим анализ требований к частотным диапазонам использования БВС, а также к значениям параметров их излучения является актуальной задачей.

Актуальной задачей также является определение требований к радиотехническим средствам обнаружения и подавления БВС таким образом, чтобы эти средства не создавали недопустимых помех другим РЭС, действующих на законной основе.

Регулирование БАС (БВС и ПУ)

В [1] рассмотрена история выделения полос частот для РЭС БАС, которая содержит как решения ГКРЧ, так и распоряжения правительства Российской Федерации и указы президента.

В 2021 г. разработана Концепция интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство Российской Федерации и план реализации концепции в части развития технологий.

Основные направления развития технологий интеграции беспилотных воздушных судов включают, в том числе, разработку и сертификацию цифровых радиолиний связи, контроля и управления в полосах частот, утвержденных регламентом радиосвязи МСЭ и таблицей распределения полос радиочастот между радиослужбами РФ. Наземное и бортовое оборудование цифровых радиолиний связи, контроля и управления подлежит обязательной сертификации, для чего необходима разработка соответствующих сертификационных требований.

В Концепции обозначено требование об оснащении всех беспилотных воздушных судов, выполняющих полеты в едином воздушном пространстве, бортовыми ответчиками, обеспечивающими передачу идентификационного номера воздушного судна, его текущих координат и информации о параметрах движения воздушного судна. Основа навигационного обеспечения полетов БВС в РФ – навигационная спутниковая система ГЛОНАСС и GPS, а в перспективе Galileo и BeiDou.

Выделение полос радиочастот для организации связи с БВС впервые принято на заседании ГКРЧ от 29 ноября 2021 года, которая своим решением № 21-60-05 выделила полосу радиочастот 5,850-6,425 ГГц с целью использования РЭС для организации связи, осуществляющих воздушное наблюдение и патрулирование БВС с целью контроля состояния удаленных промышленных объектов.

Относительно полосы 5030-5091 МГц принято решение, что ее использование воздушной подвижной и воздушной подвижной спутниковой службой в РФ ограничивается системами воздушной связи, стандартизированными на международном уровне с внесением соответствующего изменения в Таблицу распределения полос радиочастот между радиослужбами РФ.

На сегодня официальный частотный ресурс для РЭС БАС в РФ составляют следующие полосы частот: 117,975-137 МГц; 5030-5091 МГц; 5850-6425 МГц. Кроме того, решением ГКРЧ от 07.05.2007 года № 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия» (в ред. от 23.12.2022) для РЭС БПЛА, попадающих под категорию устройств

малого радиуса действия, определены уровни излучений, и условия их использования в полосах частот: 26,957-27,283 МГц, 28,0-28,2 МГц, 40,66-40,7 МГц, 433,075-434,79 МГц, 2400-2483,5 МГц.

Регулирование средств обнаружения БВС

Для применения пассивных средств обнаружения (не использующих передающие радиоэлектронные средства) не требуется выделение полос радиочастот и их регистрация.

Для активных средств обнаружения, если отсутствует обобщенное решение ГКРЧ об их использовании неопределенным кругом лиц, и нет ранее принятых решений о применении для этой цели средств радиолокационного типа, требуется получение нового решения ГКРЧ о выделении полос радиочастот, присвоении радиочастот и регистрации РЭС.

Порядок выделения полос радиочастот и регистрации средств радиоэлектронного обнаружения (далее Средства), предназначенных для противодействия БВС с целью защиты отдельных объектов, включает:

1. Доведение Федеральными органами исполнительной власти и организациями, ответственными за защиту потенциально опасных и критически важных объектов до подразделений охраны, разработчиков и пользователей, уполномоченных на применение Средств следующей информации и документов:

– решения ГКРЧ (о порядке использования радиочастотного спектра и о выделении полос радиочастот для разработки и применения средств обнаружения БВС);
– настоящий порядок выделения полос радиочастот, регистрации и использования радиочастотного спектра для применения таких средств.

2. Получение решений ГКРЧ на разработку и применение Средств.

Заинтересованные федеральные органы исполнительной власти, разработчики или уполномоченные пользователи Средств, в случае отсутствия принятого решения ГКРЧ в отношении конкретного образца, средства оформляют и представляют в ГКРЧ радиочастотную заявку, оформленную в соответствии с требованиями (состав и содержание радиочастотной заявки, инструкция по заполнению бланка формы № 1 «Тактико-технические данные РЭС»).

После принятия решения ГКРЧ о выделении полос радиочастот для разработки и применения средства оно рассылается заявителю и членам ГКРЧ, а также Федеральным органам исполнительной власти и организациям, отвечающим за защиту объектов от БВС.

3. Регистрацию Средств пользователями.

Регистрация гражданских средств радиоэлектронного противодействия (РЭП) осуществляется Роскомнадзором в соответствии с правилами и порядком, установленными постановлением Правительства Российской Федерации от 20.10.2021 № 1800.

Регистрация средств РЭП силовых структур осуществляется ФСБ России.

4. Использование радиочастотного спектра для применения Средств с целью защиты объектов.

Требования к использованию радиочастотного спектра для применения средств РЭП определены решением ГКРЧ от 27.12.2023 № 23-70-10.2 и включают:

– наличие полномочий пользователя на применение Средств;
– наличие решения ГКРЧ о выделении полос радиочастот на разработку и применение средств РЭП;
– выполнение условий совместного использования радиочастотного спектра с РЭС, предназначенными для нужд ФСБ России, ФСО России, Росавиации, ГК «Роскосмос» и ФГУП «РТРС».

Требования к радиоконтрольному оборудованию

Основные требования к радиоконтрольному оборудованию (РКО) для контроля радиопередатчиков ПУ БАС (без учета массогабаритных характеристик) включают:

– охват всей полосы частот, которая используется для радиоканалов телеуправления полетом БВС, полезной нагрузкой, приема сигналов телеметрии и потокового видео от 20 МГц до 6,5 ГГц. Необходимость охвата такой полосы объясняется требованием универсальности РКО, поскольку априори неизвестно, для обнаружения какой системы управления БАС будет применяться РКО;
– наличие полосы одновременного анализа до 200 МГц. Чем шире полоса одновременного анализа, тем выше вероятность обнаружения сигнала ППРЧ. Минимально достаточное значение полосы, обеспечивающее обнаружение каналов телеуправления, функционирующих в режиме ППРЧ большинства ПУ БАС гражданского назначения, составляет 80 МГц;
– быстродействие системы обработки сигнала, позволяющее гарантированно отображать импульсы ППРЧ длительностью не более 500 мкс в полосе анализа. Желательно, чтобы анализатор спектра обладал режимом реального времени с POI (Probability of Intercept, вероятность гарантиро-

ванно захвата с вероятностью 100 %), не превышающим 10 мкс. Это означает, что прибор сможет гарантировано зафиксировать импульсы, длительность которых не менее 10 мкс.;

– отображение спектрограммы в режиме растровой развертки или «водопада» (в осях частота – время);
– высокая чувствительность в сочетании с соответствующим динамическим диапазоном (конкретные значения этих величин должны определять по принципу – «не хуже, чем …» исходя из расчета для реальных условий);
– наличие «дифференциального» режима, аналогичного используемому в компактном мониторинговом приемнике реального времени R&S®PR100.

При активации дифференциального режима отображаются только сигналы, спектр которых отличается от сохраненного, что позволяет легко отселектировать сигналы постоянных источников излучения, не занимая экран анализатора посторонними излучениями.

Для обнаружения излучений радиопередатчиков потокового видео, расположенных на БВС, РКО должно обеспечивать контроль полос 2400 – 2483,5 МГц, 5725 – 5825 МГц или 5850 – 6425 МГц с полосой одновременного анализа не менее 20 МГц. Кроме того, принимаемый уровень радиоизлучений от БВС на станциях радиоконтроля может сильно изменяться из-за перемещения аппарата в воздушном пространстве. Поэтому приемники в составе радиоконтрольного оборудования должны иметь возможность принимать как сильные, так и очень слабые сигналы.

Таким образом, сопоставляя требования к РКО для обнаружения излучений передатчиков ПУ и БВС, можно сделать вывод, что к оборудованию для обнаружения излучений наземных ПУ предъявляются более жесткие требования по охвату частотного диапазона (от 20 МГц до 6,5 ГГц), полосе одновременного анализа (не менее 80 МГц до 200 МГц) и быстродействию, а к РКО для обнаружения излучений БВС предъявляются более жесткие требования по динамическому диапазону.

Определение местоположения БВС

Для определения местоположения БВС может быть применен как способ радиопеленгования, так и гиперболический (разностно-дальномерный) способ координатометрии на основе измерения времени прихода радиоволны в несколько (3-х и более) приемных пунктов, в которых размещены приемные устройства (сенсоры) системы обнаружения. Может быть применен и энергетически-дальномерный способ координатометрии, основанный

на измерении уровней излучений от передатчика в 3-х пространственно разнесенных приемных пунктах [2] и другие способы [3-5].

Каждый из перечисленных способов имеет свои достоинства и недостатки, определяемые количеством и стоимостью радиоконтрольного оборудования.

Список используемых источников

1. Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Симонина О. А., Федоров С. Л. Анализ требований к параметрам излучений радиотехнического оборудования беспилотных авиационных систем Известия ЮФО. Технические науки. № 5. 2023. С. 193-203.

2. Александров И. В., Антипин Б. М., Спирин А. Д. Определение местоположения источников радиоизлучений в условиях сложного окружения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 4 томах. 2017. С. 31-35.

3. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под редакцией А. М. Рембовского. М: Горячая линия. Телеком, 2006. 492 с: ил. ISBN 5-93517-326-3.

4. Логинов Ю. И., Екимов О. Б., Антипин Б. М., Гриценко А. А., Павлов В. Н., Портнаго Л. Б. Дальномерно-разностно-дальномерный способ определения координат местоположения источников радиоизлучений и реализующее его устройство. Патент на изобретение № 2510038. Заявка № 2011134103. Приоритет изобретения 12 августа 2011 г.

5. Spirin A. D., Antipin B. M. Non-conventional algorithm of radio transmission sources position location. // В сборнике: Proceeding s of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017. С. 565-568.

REGULATION AND MONITORING OF THE USE OF ELECTRONIC MEANS OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

Aleksandrov I., Antipin B., Vinogradov E., Shabrova E.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The issues of radio frequency regulation of radio electronic means of unmanned aircraft systems to ensure their electromagnetic compatibility with other radio electronic means are considered. The requirements for monitoring the use of radio frequency resources by mobile and stationary elements of unmanned aircraft systems are given. These tools should provide an assessment of the radiation parameters of radio equipment, both mobile and stationary elements of such systems, and determine their location. Some issues related to the regulatory regulation of the use of the radio frequency spectrum by means of detection and suppression of unmanned aircraft are also considered.

Key words: radio frequency regulation; unmanned aircraft systems; spectrum monitoring

УДК 004.75
ГРНТИ 49.37.29

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ДЛЯ СЕТЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

А. М. Аль-Анси, М. А. Виницкий, Е. В. Дусталев, А. Е. Кучерявый

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Цифровые системы в современных автомобилях быстро развиваются, в них внедряются все более требовательные к вычислительной мощности задачи, вплоть до алгоритмов беспилотного вождения. Однако часто не все ресурсы автомобиля используются для выполнения поставленных задач. Этот незадействованный ресурс может быть использован для помощи в выполнении задач для менее обеспеченных вычислительными ресурсами автомобилей, совместных задач для функционирования Интеллектуальной транспортной системы или повышения качества обслуживания и качества восприятия для абонентов, находящихся в непосредственной близости к транспорту. В данной статье предложена архитектура распределенной сети предоставления цифровых услуг для автотранспорта и рассмотрены методы распределения ресурсов для сетей автомобильного транспорта.

транспортные граничные вычисления, VEC, распределение ресурсов, выгрузка задач, ИТС

Транспортные средства, в частности автомобили на дорогах общего пользования, с каждым годом оборудуются все более мощными вычислительными устройствами. Это обусловлено внедрением современных систем безопасности, систем помощи водителю, возможностей беспилотного управления, а также развитием мультимедийных систем.

Одновременно с этим, с развитием сетей 5G и перспективных 6G, все больше внимания уделяется концепции граничных вычислений. Концепция предполагает перенос обработки данных и предоставления сервисов с централизованных облачных дата-центров на границу сети, максимально близко к пользователям и устройствам [1, 2].

Объединение этих факторов приводит к появлению понятия – Транспортные граничные вычисления (Vehicular Edge Computing, VEC). Подобная концепция может быть использована в решении задач интеллектуальных транспортных систем (ИТС): оптимизация дорожного трафика в реальном времени, обеспечение связи и взаимодействия между автомобилями, дорожной инфраструктурой, для предоставления сервисов безопасности, совместного движения и различных коммерческих сервисов. Помимо сер-

висов ИТС, VEC может быть полезен и в задачах за пределами транспорта, например, для поддержания качества обслуживания (QoS) пользователей, находящихся в географической близости к дорожной системе [3].

Однако важно отметить особенности такой вычислительной сети. Сеть граничных транспортных вычислений должна сочетать производительность и вычислительную мощность, характерные для фиксированных сетей, с функциональностью мобильных сетей, включая передачу обслуживания (хендовер) и обеспечение непрерывности сервиса для подвижных абонентов. Для чего необходимо использование методов распределения ресурсов в динамической сети автомобильного транспорта [4].

По некоторым оценкам, полностью автономный автомобиль может генерировать до 1 ГБ данных в секунду. Использование и работа с таким объемом данных требует значительных вычислительных мощностей и пропускной способности сети. Своевременная обработка этой информации критически важна для задач чувствительных к задержке сервисов, таких как предотвращение столкновений или маневрирование в потоке. В условиях, когда локальных ресурсов одного транспортного средства недостаточно, или когда требуется координация действий группы автомобилей, возникает необходимость введения методов распределения ресурсов для совместной работы над этими задачами. Эффективное распределение позволяет выгружать энергоемкие и сложные задачи на более мощные узлы (другие автомобили, граничные или облачные серверы), обеспечивая соблюдение строгих требований по времени доставки и обработки данных [3, 4].

Архитектура сети также должна отвечать требованиям со стороны представленных задач и иметь возможность использования вычислительных мощностей наиболее эффективно в условиях ограниченного времени работы, обусловленного движением транспортного потока. Учитывая это, на рис. 1 представлена обобщенная архитектура VEC, отражающая необходимые аспекты связности, коммуникации и мобильности, необходимые для понимания и анализа различных проблем и решений в области распределения ресурсов.

Как показано на рис. 1, типовая архитектура VEC включает первичные задающие устройства (Primary task entities, PTEs) – ресурсно-ограниченные устройства, такие как смартфоны, планшеты и ноутбуки пешеходов и пассажиров транспортных средств. В зависимости от сценария, вычислительно-емкие задачи, выполняемые на этих устройствах, могут быть выгружены (переданы для выполнения) либо на припаркованные, либо на движущиеся автомобили при условии, что соединение считается стабильным.

Транспортные средства в такой VEC могут быть движущимися/припаркованными автономными/неавтономными автомобилями, автобусами, грузовиками и т.д. Эти автомобили могут как обладать, так и не обладать способностью функционировать в роли исполняющих-автомобилей (Service Vehicles, SeV) или запрашивающих-автомобилей (Task Vehicles, TaV). Либо быть способными выполнять обе роли одновременно. TaV могут разгружать свои задачи на граничные серверы, расположенные на базовых станциях сотовой связи или придорожных блоках (RSU), которые, в свою очередь, могут перенаправлять их на облачные серверы в зависимости от требований. Кроме того, возможно, что разные автомобили обладают разными вычислительными возможностями (например, обычный автомобиль имеет значительно меньше ресурсов, чем автономное транспортное средство). Поэтому существует возможность автомобильной выгрузки задач между автомобилями (V2V computation offloading) [3, 4].

В ряде современных исследований предлагается многоуровневая архитектура, объединяющая облачные, туманные (fog) и граничные вычисления. В такой иерархии транспортные средства могут формировать временные туманные кластеры для совместного решения задач, что позволяет еще больше снизить задержки по сравнению с обращением к стационарным RSU.

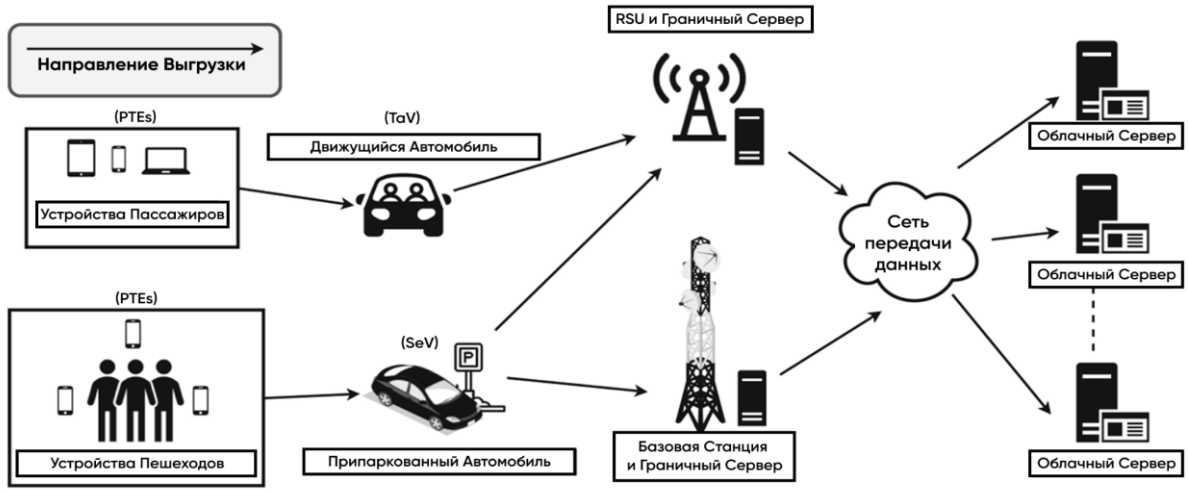


Рис. 1. Архитектура сети транспортных граничных вычислений

Распределение ресурсов между различными объектами, задействованными в сценариях VEC, является комплексной задачей с множеством параметров. Поэтому в большинстве исследований используются хорошо зарекомендовавшие себя математические и вычислительные методы для моделирования проблемы распределения ресурсов и ее решения путем оптимизации требуемых параметров. Среди наиболее соответствующих по

свойствам быстро меняющейся распределенной сети вычислительных устройств можно выделить метод Гаусса-Зейделя, метод поиска функции Ляпунова и теорию игр [5, 6]. В таблице 1 приведен сравнительный анализ методов распределения ресурсов и предложены сценарии использования каждого из представленных методов.

Метод Гаусса-Зейделя – итерационный численный метод для решения систем линейных алгебраических уравнений. На основе представленного метода предлагается решение задачи распределения вычислительных ресурсов в коллаборационной сети подключенного транспорта на основе устройств с граничными вычислениями [3]. Следующее уравнение может дать значение мощности, рассеиваемой через выходные контакты ядра процессора:

$$P = 0{,}5 \times C \times V^2 \times f,$$

где P – мощность, потребляемая процессором, C – емкость, V – напряжение питания, а f – рабочая частота ядра процессора. Таким образом, коэффициент f рассчитывается с использованием метода Гаусса-Зейделя для оптимизации энергопотребления при выполнении выгруженных задач [3].

Оптимизация по Ляпунову – это метод использования функции Ляпунова для обеспечения стабильности динамической системы. Данный подход позволяет решать проблемы распределения ресурсов, добиваясь компромисса между потреблением энергии и задержкой без необходимости знания долгосрочной статистики системы. Например, в ряде работ этот метод используется для разработки алгоритмов (например, ARAEUE), направленных на улучшение пользовательского опыта за счет минимизации потери качества обслуживания при соблюдении ограничений по энергопотреблению и очередям задач [5].

Теория игр – это математический метод изучения стратегий в ситуациях (играх), где задействовано несколько сторон (игроков), и результат для каждого игрока зависит от решений других. Для VEC сценариев широко используются кооперативные и некооперативные модели. Кооперативные модели применяются для формирования альянсов между транспортными средствами для совместного использования ресурсов, максимизируя общую пропускную способность. Некооперативные модели (например, игры по Нэшу) используются в ситуациях, когда автомобили конкурируют за ограниченные ресурсы граничных серверов (RSU), позволяя распределять каналы связи и вычислительные мощности, гарантируя надежность и минимизируя задержки, что критично для сетей URLLC V2X. Также применяются механизмы аукционов для стимулирования транспортных средств предоставлять свои свободные ресурсы [4].

ТАБЛИЦА 1. Сравнение методов распределения ресурсов для задач VEC

Метод	Сильные стороны метода	Недостатки	Предпочтительный сценарий применения
Метод Гаусса-Зейделя	– низкие вычислительные затраты на одну итерацию; – эффективен для оптимизации конкретных параметров (например, частоты процессора) в стационарных условиях	– не учитывает динамику изменения состояния сети (трафик, помехи); – скорость сходимости может быть низкой для больших систем	оптимизация энергопотребления на стационарных граничных узлах (RSU) или в медленно меняющихся сегментах сети, где параметры нагрузки относительно стабильны
Оптимизация по Ляпунову	– обеспечивает долговременную стабильность системы (очередей, буферов); – не требует знания точной статистики будущих событий	– сложность подбора подходящей функции Ляпунова; – чувствителен к выбору весовых коэффициентов в целевой функции	сценарии с жесткими требованиями к задержке и энергопотреблению в условиях непредсказуемого трафика, например, для задач автономного вождения (коллизия, экстренное торможение) при ограниченном заряде батареи электромобиля
Теория Игр	– эффективно моделирует конкуренцию и кооперацию между независимыми агентами (автомобилями); – позволяет децентрализованно распределять ресурсы (каналы, вычислительные мощности)	– требует непрерывного обмена информацией между агентами, что создает дополнительные сетевые издержки; – вычислительная сложность поиска равновесия (например, равновесия Нэша) может быть высокой	распределение ограниченных ресурсов (например, каналов связи RSU) между большим количеством автомобилей в плотном трафике, а также организация рынка вычислительных ресурсов между припаркованными (SeV) и движущимися (TaV) автомобилями

В статье проведен анализ текущего состояния и перспектив развития сетей транспортных граничных вычислений (VEC). Предложена обобщенная архитектура, демонстрирующая возможности выгрузки задач между транспортными средствами, граничными RSU и облаком. Рассмотрены ключевые математические методы (метод Гаусса-Зейделя, оптимизация по Ляпунову, теория игр), применяемые для решения задач эффективного рас-

пределения вычислительных и сетевых ресурсов в динамических условиях транспортного потока. Показано, что выбор метода зависит от конкретного сценария использования и требуемого компромисса между задержкой, энергопотреблением и надежностью связи.

Список используемых источников

1. Zhang J., Letaief K. B. Mobile edge intelligence and computing for 6G: Characteristics, challenges, potential use cases and market drivers // arXiv preprint arXiv:1911.11646. 2019. URL: arxiv.org (дата обращения: 16.03.2026).

2. Survey on Intelligence Edge Computing in 6G: Characteristics, Challenges, Potential Use Cases, and Market Drivers / A. Al-Ansi, A. M. Al-Ansi, A. Muthanna et al. // Electronics. 2023. Vol. 12, iss. 4. P. 957. DOI: 10.3390/electronics12040957.

3. A survey on computation resource allocation in IoT enabled vehicular edge computing / S. Raza, S. Wang, M. Ahmed, M. R. Anwar // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 72271–72290. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920155.

4. A review of resource allocation in vehicular edge computing: Methodologies and challenges / L. Liu, C. Chen, T. Qiu et al. // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9, iss. 13. P. 10830–10850. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3146445.

5. Wang K., Yang K., Magurawalage C. S. S. Joint energy-efficient and delay-aware task offloading in vehicular fog computing: A Lyapunov-based approach // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67, iss. 11. P. 11130–11144. DOI: 10.1109/TVT.2018.2868213.

6. Al-Ansi A. M., Al-Ansi A. An Overview of Artificial Intelligence (AI) in 6G: Types, Advantages, Challenges and Recent Applications // URL: https://www.researchgate.net/publication/368364309_An_Overview_of_Artificial_Intelligence_AI_in_6G_Types_Advantages_Challenges_and_Recent_Applications (дата обращения: 16.03.2026).

ANALYSIS OF RESOURCE ALLOCATION METHODS FOR VEHICULAR NETWORKS

Al-Ansi A., Vinitsky M., Dustalev E., Koucheryavy A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Digital systems in modern vehicles are evolving rapidly, incorporating increasingly computationally demanding tasks, up to and including autonomous driving algorithms. However, often not all of a vehicle's resources are utilized for executing these tasks. This unused capacity can be leveraged to assist vehicles with fewer computational resources in performing their tasks, to handle collaborative tasks for the operation of Intelligent Transportation Systems, or to enhance the quality of service and quality of experience for users in close proximity to the vehicles. This paper proposes an architecture for a distributed network providing digital services for vehicular transport and reviews resource allocation methods for vehicular networks.

Key words: vehicular Edge Computing, VEC, resource allocation, task offloading, ITS

УДК 621.396.969
ГРНТИ 47.49.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА MUSIC

Е. С. Багаев, Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуется влияние доплеровского сдвига, вызванного движением пользовательского устройства, на точность определения времени прихода сигнала с использованием подпространственного алгоритма MUSIC в беспроводной локальной сети Wi-Fi. С помощью средств имитационного моделирования анализируется снижение точности оценки времени прихода сигнала при различных скоростях движения и конфигурациях многолучевого канала.

беспроводная локальная сеть, позиционирование, стандарт 802.11az, Time-Of-Arrival, алгоритм сверхразрешения

Современные беспроводные локальные сети (БЛС) Wi-Fi (Wireless-Fidelity) находят применение не только в сфере предоставления услуг, но и в задачах позиционирования пользовательских устройств (ПУ) [1, 2, 3]. Одним из подходов к определению местоположения (ОМП) в БЛС является измерение расстояния до точки доступа (ТД) на основе информации о времени прихода сигнала *ToA* (Time-of-Arrival) при передаче между устройствами [4, 5]. Для повышения разрешающей способности во времени существует множество методов, работающих с подпространством сигналов [6, 7]. Одним из наиболее популярных подпространственных алгоритмов для оценки *ToA* является MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) [8], позволяющий эффективно разделять близко расположенные многолучевые компоненты (МЛК). Однако, при условии движения ПУ относительно ТД, возникающий доплеровский сдвиг может приводить к смещению пиков МЛК в псевдоспектре и последующей некорректной оценке *ToA* [9].

Импульсная характеристика (ИХ) при передаче сигнала в БЛС описывается как:

$$h(t) = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m \delta(t - \tau_m), \qquad (1)$$

где M – число МЛК; α_m – величина затухания m-й МЛК; τ_m – задержка распространения m-й МЛК.

Принимаемый сигнал может быть записан как:

$$x(t) = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m s(t - \tau_m) + w(t), \quad (2)$$

где s – известный переданный сигнал с полосой пропускания B, центральной частотой f_c и длительностью T_0; $w(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ).

При переходе в частотную область частотная характеристика (ЧХ) многолучевого канала строится на основе спектров принимаемого и переданного сигнала:

$$X(f) = S(f)H_f(f) + W(f), \quad (3)$$

где $X(f)$ и $S(f)$ – спектры принимаемого и переданного сигнала соответственно; $W(f)$ – спектр шума; $H_f(f)$ – ЧХ многолучевого канала.

ЧХ может быть получена путем деления спектров:

$$H_f(f) = \frac{X(f)}{S(f)}, \quad (4)$$

Для формирования псевдоспектра при использовании алгоритма *MUSIC* вводится частотный вектор канала **H**=**UA**, где **U** – вектор управления по задержке и **A** – вектор комплексных амплитуд. При этом **U**=[$\mathbf{u}(\tau_1)$,…, $\mathbf{u}(\tau_M)$] $\in C^{N\times M}$, $\mathbf{u}(\tau_M)$=[1, $e^{-j2\pi\Delta f\tau_m}$,…, $e^{-j2\pi\Delta f(N-1)}\tau_M]^T \in C^N$, **A** = [$\alpha_1$,…, α_M], $\alpha_m = \alpha_m e^{-j2\pi\Delta f0\tau_m}$ при $m\in\{1,\ldots,M\}$, f_0 – самая низкая частотная компонента в пределах полосы B, Δf – интервал между выборками по частоте. Значения N и M представляют собой количество выборок и количество МЛК соответственно.

Далее, наблюдения в частотной области записываются как:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{UA} + \boldsymbol{W}, \quad (5)$$

где **Y** – матрица ЧХ для нескольких реализаций, **W** – матрица шума.

Ковариационная матрица **Y** записывается как:

$$\boldsymbol{R}_Y = E\{\boldsymbol{YY}^H\} = \boldsymbol{UR}_A\boldsymbol{U}^H + \sigma_v^2\boldsymbol{I}, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{R}_A = E\{\mathbf{AA}^{\mathrm{H}}\}$, σ_{v}^2 – шум.

Для построения ковариационной матрицы $\mathbf{R}_{\mathrm{Y}}$ требуется Q наблюдений вектора **Y**, причем они должны быть статистически однородны.

Если задержки $\{\tau_m\}_{m=1}^M$ независимы, матрица **U** имеет полный ранг, значения $\{a_m\}_{m=1}^M$ являются постоянными, то ковариационная матрица $\mathbf{R}_{\mathrm{A}}$

будет невырожденной. Тогда ранг матрицы $\mathbf{U}\mathbf{R}_{\text{A}}\mathbf{U}^{\text{H}}$ будет равен M, при $M < Q$. Собственные векторы, соответствующие Q-M наименьшим значениям, образуют шумовое подпространство, а M векторов при наибольших собственных значениях – сигнальное подпространство.

Таким образом, Q-мерное пространство раскладывается на два ортогональных пространства. Шумовое подпространство определяется как $\boldsymbol{P} = [\boldsymbol{q}_{M+1},\ldots,\boldsymbol{q}_Q]$, где $\{q_m\}_{k=M+1}^{Q}$.

Далее, псевдоспектр *MUSIC* определяется как:

$$S_{MUSIC}(\tau) = \frac{1}{|\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}(\tau)|^2}, \tag{7}$$

Так как вектор $\mathbf{u}\{\tau_m\}_{m=1}^{M}$ относится к сигнальному подпространству, то в соответствии со свойством ортогональности шумового и сигнального подпространств справедливо равенство $\mathbf{P}\mathbf{u}(\tau_m) = 0$. Задержка распространения *m-й* МЛК может быть определена с помощью поиска таких значений задержки, при которых S_{MUSIC} достигает максимума. Далее, *ToA* сигнала может быть оценено с помощью определения первого пика в псевдоспектре на временной оси. Для определения *ToA* выбирается пороговое значение, ниже которого значения псевдоспектра не учитываются.

В задачах ОМП ПУ значения *ToA* используются для определения расстояния d до от ПУ до ТД. Искомое расстояние d рассчитывается как произведение *ToA* на скорость света c.

При движении устройства с некоторой скоростью v каждая МЛК получает доплеровский сдвиг $\Delta f_D = \frac{v \cdot f_c}{c}$. При этом отклик каждой МЛК будет равен:

$$H_m(f_n, t) = \alpha_m e^{-j2\pi f_n \tau_m} e^{j2\pi \Delta f_D m t}. \tag{8}$$

При наблюдении на интервале, сравнимом со временем когерентности, меняется фаза между наблюдениями $\mathbf{Y}_q$, $q = 1,\ldots,Q$.

Выражение 6 в таком случае принимает вид:

$$\boldsymbol{R}_Y = E\{\boldsymbol{Y}\boldsymbol{Y}^H\} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{R}_{A_{\Delta f_D}}\boldsymbol{U}^H + \sigma_v^2 I, \tag{9}$$

где $\mathbf{R}_{\text{A}} = E\{\mathbf{A}_{\Delta fD}\ \mathbf{A}_{\Delta fD}{}^{\text{H}}\}$ зависит от Δf_D. Из-за изменения канала во времени ковариационная матрица перестает удовлетворять выражению (6), а собственные векторы шумового подпространства уже не являются строго ортогональными $\mathbf{u}(\tau_M)$.

На рисунке 1 приведен псевдоспектр *MUSIC* при передаче сигнала по многолучевому каналу *TGax Model-C* [0]. Центральная частота f_c = 5 ГГц, ширина канала B = 40 МГц, ТД находится на расстоянии 20 метров от ПУ, при этом оба устройства неподвижны и $\Delta f_D = 0$.

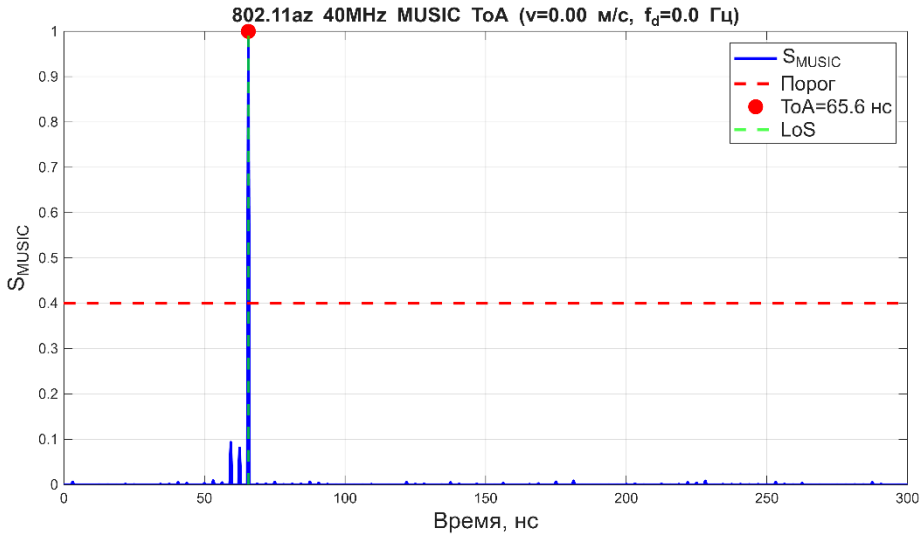


Рис. 1. Псевдоспектр *MUSIC* при v = 0 м/с

Из рисунка 1 видно, что при отсутствии доплеровского сдвига псевдоспектр *MUSIC* имеет четко выраженный максимум, при этом *ToA* = 65,6 нс. Такое время прихода сигнала соответствует прохождению сигнала на расстояние 20 м. Ошибка при определении *ToA* в таком случае составляет Δt = 0 нс.

На рисунке 2 приведен псевдоспектр *MUSIC* для случая, когда на расстоянии 20 м ПУ двигалось v = 1 м/с, при этом Δf_D = 13,7 Гц.

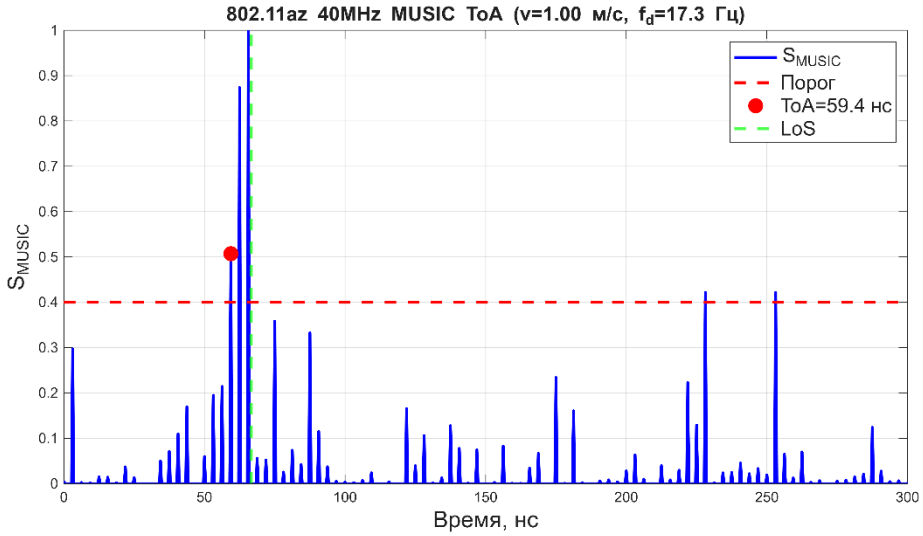


Рис. 2. Псевдоспектр MUSIC при v = 1 м/с

На рисунке 2 показано, что при движении ПУ главный пик псевдоспектра сохраняет свое положение вблизи истинного *ToA*, однако заметно увеличивается уровень побочных компонент в псевдоспектре. Это указывает на нарушение ортогональности между сигнальным и шумовым подпространствами. Ошибка при определении *ToA* равна $\Delta t = 6{,}2$ нс.

На рисунке 3 приведен псевдоспектр *MUSIC* для случая, когда на расстоянии 20 м ПУ двигалось со скоростью $v = 4$ м/с, при этом $\Delta f_D = 69{,}1$ Гц.

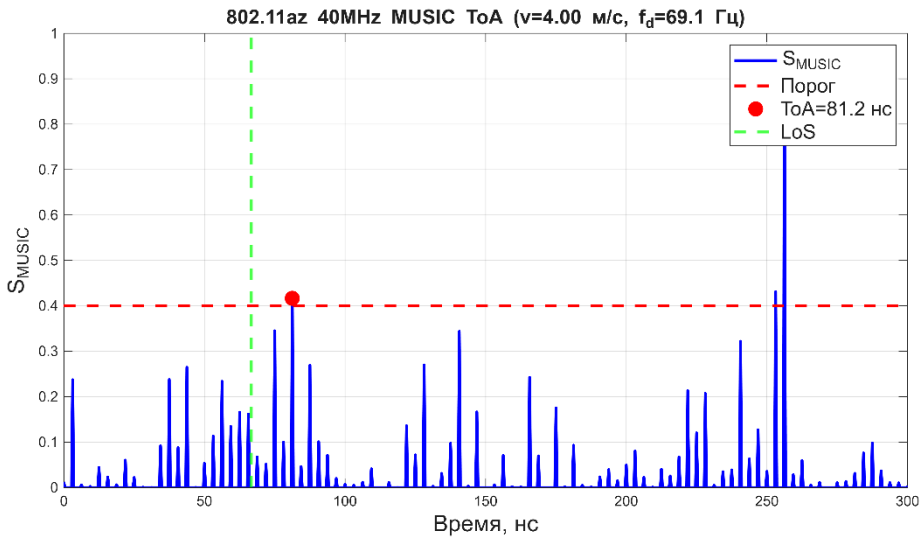


Рис. 3. Псевдоспектр MUSIC при $v = 4$ м/с

При увеличении скорости движения до 4 м/с доплеровский сдвиг приводит к существенному снижению уровня главного пика псевдоспектра, соответствующего истинному *ToA*. Ошибка при определении *ToA* равна $\Delta t = 15{,}6$ нс.

Проведенное исследование показывает, что возникающий доплеровский сдвиг, вызванный движением ПУ относительно ТД, приводит к росту уровня побочных максимумов и снижению высоты истинного пика МЛК. При пороговой оценке с помощью алгоритма *MUSIC* изменение псевдоспектра может привести к ошибкам определения истинного *ToA* сигнала. В дальнейшем, ошибка Δd при определении расстояния по измеренным значениям *ToA* составит 0 м при $v = 0$ м/с, $\Delta d = 1{,}8$ м при $v = 1$ м/с и $\Delta d = 4{,}6$ м при $v = 4$ м/с. Полученные результаты подчеркивают необходимость компенсации изменения параметров канала во времени для повышения точности процедуры ОМП в БЛС *Wi-Fi*.

Список используемых источников

1. Liu F. et al. Survey on Wi–Fi-based indoor positioning techniques //IET communications. 2020. Т. 14. № 9. С. 1372-1383.
2. Feng X., Nguyen K. A., Luo Z. A survey of deep learning approaches for WiFi-based indoor positioning //Journal of Information and Telecommunication. 2022. Т. 6. № 2. С. 163-216.
3. Фокин Г. А., Багаев Е. С., Мещеряков Д. Е. Позиционирование в беспроводных локальных сетях WI-FI стандарта IEEE 802.11 az. Часть 1. Постановка задачи достижения дециметровой точности //ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2025. № 1. С. 50-56.
4. Rogel N., Raphaeli D., Bialer O. Time of arrival and angle of arrival estimation algorithm in dense multipath //IEEE Transactions on Signal Processing. 2021. Т. 69. С. 5907-5919.
5. Liu Z. et al. Machine learning for time-of-arrival estimation with 5G signals in indoor positioning //IEEE Internet of Things Journal. 2023. Т. 10. № 11. С. 9782-9795.
6. Zhao F. et al. Comparison of super-resolution algorithms for TOA estimation in indoor IEEE 802.11 wireless LANs //2006 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. IEEE, 2006. С. 1-5.
7. Li Y., Yu J., He L. TOA and DOA Estimation for IR-UWB Signals: An Efficient Algorithm by Improved Root-MUSIC //Wireless Communications and Mobile Computing. 2021. Т. 2021. № 1. С. 9960273.
8. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation //IEEE transactions on antennas and propagation. 1986. Т. 34. № 3. С. 276-280.
9. Oh D., Lee J. Robust super-resolution TOA estimation against doppler shift for vehicle tracking //IEEE communications letters. 2014. Т. 18. № 5. С. 745-748.
10. IEEE 802.11ax Task Group. Channel Model Document. URL: https://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.html (дата обращения: 20.01.2026).

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE DOPPLER SHIFT ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE TIME OF ARRIVAL OF THE SIGNAL USING THE MUSIC ALGORITHM

Bagaev E., Fokin G.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines the effect of the Doppler shift caused by the movement of a user device on the accuracy of determining the arrival time of a signal using the subspace MUSIC algorithm in a wireless local area network Wi-Fi. With the help of simulation modeling tools, the decrease in the accuracy of estimating the time of arrival of a signal at different speeds and multipath channel configurations is analyzed.

Key words: wireless LAN, positioning, 802.11az standard, Time-Of-Arrival, super-resolution algorithm

УДК 654.16
ГРНТИ 49.43.29

ПРИМЕНЕНИЕ УЗКОПОЛОСНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕСТ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ

К. З. Билятдинов, Д. П. Лобеев

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Статья посвящена проектированию сетей радиосвязи LTE-1800 TDD для высокоскоростной магистрали Москва–Санкт-Петербург. Рассматриваются нетиповые ситуации, в частности, пересечение сетей, работающих на одной частоте. Для их решения предложены модели с использованием ширины полосы 3 МГц и 1.4 МГц, которые позволяют разделить систему на группы частот, упрощая расчеты электромагнитной совместимости и обеспечивая надежную работу.

проектирование радиосетей, ширина полосы частоты, радиочастотный спектр, железнодорожный транспорт, LTE-1800 TDD

В настоящее время ведется активная стадия проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD для высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Санкт-Петербург. При проектировании возникают различные нетиповые ситуации, которые вносят множество трудностей. Например, проектирование мест пересечений двух сетей радиосвязи, работающих на одной частоте в одном частотном диапазоне. Для безотказной работы сети в данной ситуации была разработана модель применения способов проектирования мест пересечений [1-3].

Рассмотрим более подробно способы с применением ширины полосы 3 МГц и 1.3 МГц.

Способ с применением полосы 3 МГц имеет схожую структуру, как и в способах для ширины полосы 10 МГц и 5 МГц (№ 1 и № 2) [1-4], но имеет важную особенность.

Краткий алгоритм работы показан на рис.1.



Рис. 1. Схема алгоритма работы модели с применением способа проектирования № 3 (3 МГц)

В структуре модели возможно разделение на 3 группы частоты по 3 МГц (в соответствии с Решением ГКРЧ № 18-46-02 от 11.09.2018 г. о выделении полосы с шириной не более 10 МГц) [5]. Данная опция позволит упростить расчеты помех с точки зрения электромагнитной совместимости (ЭМС).

Пример зоны обслуживания базовой станции в месте пересечения с применением данного способа показан на рис. 2.

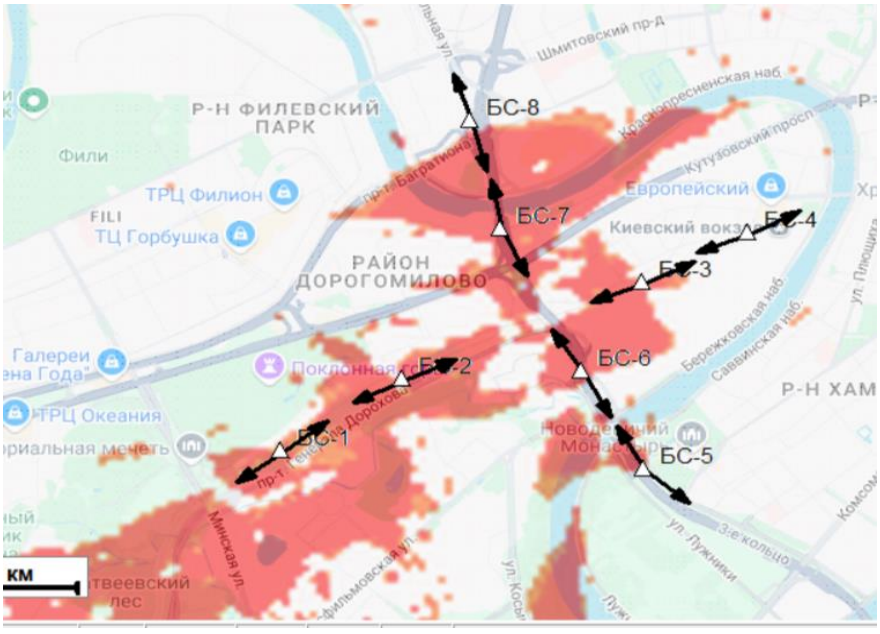


Рис. 2. Зона обслуживания базовых станций в месте пересечения

При выборе номинала в 1.4 МГц в модели будет наблюдаться высокая дальность радиосвязи, но самая низкая пропускная способность (ограниченный объем передаваемых данных).

Алгоритм работы способа представлен на рис. 3.

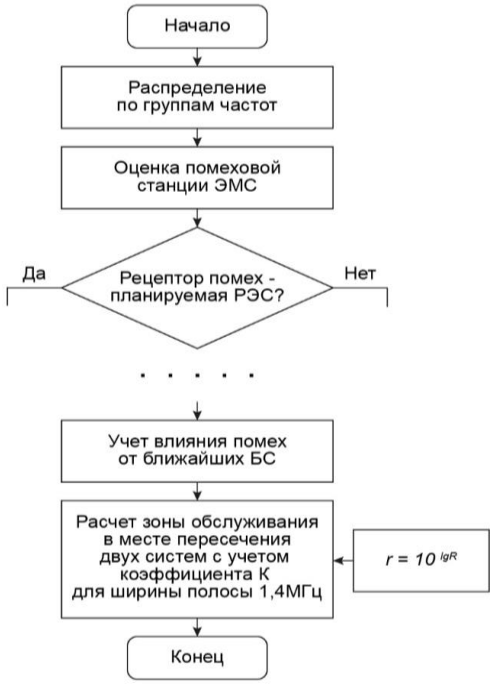


Рис. 3. Схема алгоритма работы модели с применением способа № 4 (1.4 МГц)

Данный номинал полосы частоты позволяет «разбивать» систему на 7 групп частот, что еще более благоприятно для ЭМС. Пример показан на рис. 4.

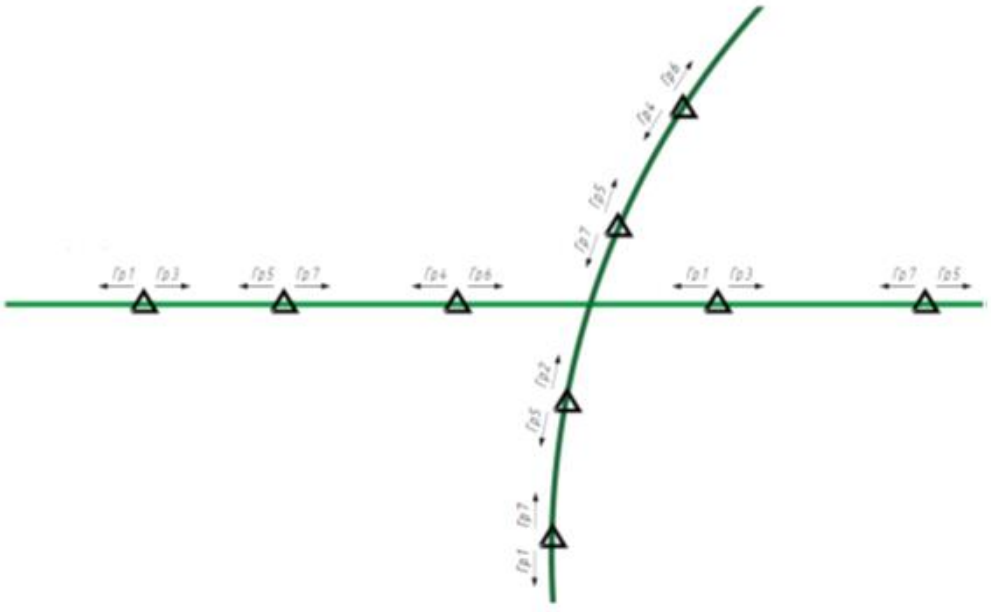


Рис. 4. Распределение частот по группам

Список используемых источников

1. Лобеев Д. П. Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22. Вып. 3. С.712-721.

2. Лобеев Д. П., Гриценко А. А., Билятдинов К. З. Применение комплекса моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD. // Век качества. 2025 № 3. С. 183-197.

3. Лобеев Д. П., Билятдинов К. З. Основы разработки и совершенствования моделей и алгоритмов проектирования сетей связи стандарта LTE-1800 TDD. // Электросвязь. 2025 № 10. С. 72-77.

4. Лобеев Д. П. Билятдинов К. З. О разработке и применении методики оптимизации использования частотного спектра при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 53-61. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-53-61. EDN: RTUYNI.

5. Решение ГКРЧ № 18-46-02 от 11.09.2018 г. «О выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте».

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры информатики и информационной безопасности, доктором технических наук, доцентом Билятдиновым К. З.

APPLICATION OF NARROWBAND MODELS FOR DESIGNING RADIO NETWORK INTERSECTIONS ON A HIGH-SPEED RAILWAY LINE

Bilyatdinov K., Lobeev D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article focuses on the design of LTE-1800 TDD radio communication networks for the high-speed Moscow–Saint Petersburg railway line. It addresses non-standard situations, particularly the intersection of networks operating on the same frequency. To resolve these, models utilizing bandwidths of 3 MHz and 1.4 MHz are proposed. These models enable the division of the system into frequency groups, simplifying electromagnetic compatibility calculations and ensuring reliable operation.

Key words: radio network design, bandwidth, radio frequency spectrum, rail transportation, LTE-1800 TDD

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА MIMO-OFDM МЕТОДОМ RAY TRACING

А. В. Бобровский, О. А. Симонина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье представлены результаты моделирования поведения сигнала MIMO-OFDM в закрытом пространстве с помощью метода Ray Tracing, исследованы такие характеристики сигнала как потери на распространение и вероятность битовой ошибки при изменяющемся пути прохождения луча от передатчика к приемнику. В статье рассмотрены вопросы ухудшения качественных показателей сигнала при прохождении путем без прямой видимости, по сравнению с путем прямой видимости, и изменении характеристик сигнала при изменении характеристик антенных решеток приемника и передатчика. Показано насколько повышается требование к отношению Eb/No для сохранения соответствующих параметров сигнала при использовании траекторий луча непрямой видимости.

MIMO, OFDM, Ray-Tracing, BER, Radio Propagation

При анализе наиболее востребованных технологий высокоскоростной передачи данных, таких как последние версии стандартов семейства IEEE 802.11 и мобильные сети последних поколений, можно отметить использование идентичных подходов к формированию сигнала. К таким подходам относятся MIMO (Multiple Input Multiple Output) и OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), часто применяемые в комбинации. При этом другие методы, например, N-OFDM, не получили широкого распространения. Если говорить о методах прогнозирования характеристик сигнала, то, помимо классических статистических и детерминированных подходов, в настоящее время активно применяется метод трассировки лучей (Ray Tracing), который в последние годы демонстрирует значительный рост популярности [1]. Несмотря на то, что данный метод требует значительно более высоких вычислительных ресурсов по сравнению с эмпирическими методами, он обеспечивает существенно меньшую погрешность в прогнозировании. Например, авторы исследования [2] достигли средней погрешности в оценке затухания сигнала на уровне 0,47 дБ, в то время как эмпирические модели часто демонстрируют ошибки, достигающие до 10 дБ.

Таким образом, в данном исследовании для анализа актуальной конфигурации высокоскоростных сетей связи выбран метод Ray Tracing. Инструментом для анализа выбран математический пакет MATLAB, который включает в себя множество настраиваемых функций и методов для моделирования радиосигнала.

Ключевым местом применения семейства технологий IEEE 802.11 являются закрытые пространства. Для проведения исследований в области модуляции сигнала необходимо использовать помещения с различными препятствиями, такими как стены, мебель (столы, стулья, шкафы) и другие объекты, которые могут вызывать отражение радиоволн.

В процессе переотражения лишь часть первоначальной энергии луча попадает в повторно отраженный луч, в то время как оставшаяся энергия поглощается препятствием. Количество отраженной энергии варьируется в зависимости от характеристик и материала препятствия. При использовании различных типов стен в качестве препятствий после нескольких актов переотражения интенсивность луча значительно снижается, поэтому было принято решение ограничить анализ путями с не более чем двумя переотражениями. Также фактором ограничения стала высокая вычислительная сложность моделирования. Для технологии MIMO были определены две конфигурации антенных решеток: с размерностью 2 и 4. На рисунке 1 представлены схемы расположения передающих антенн [3].

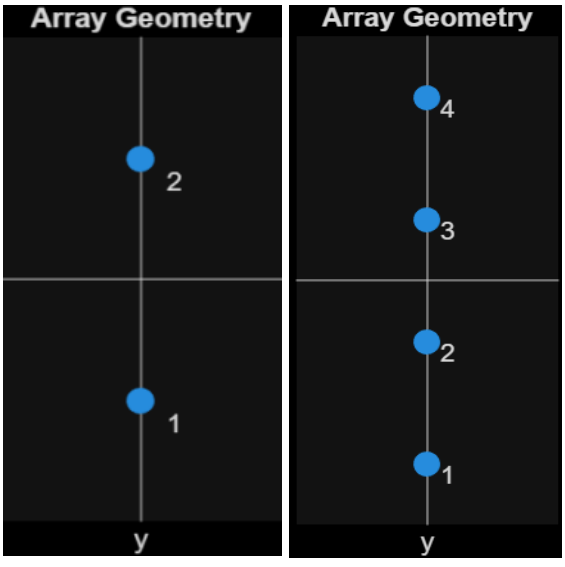


Рис. 1. Конфигурации антенн передатчика с размерностью 2 и 4

Для анализа относительных положений было разработано три сценария, охватывающих наиболее типичные конфигурации размещения оборудования внутри помещений. Два из них предполагают различное расстояние

между передатчиком и приемником при условии прямой видимости, а третий сценарий исключает наличие прямой видимости. Полученные траектории распространения радиоволн представлены на рисунке 2. Легко видеть, что существует значительная разница в потерях на распространение между путями прямой и не прямой видимости (1,4 м, 2,8 м и 4,5 м). Различные траектории распространения сигналов характеризуются разной длиной, что приводит к различным временным задержкам в достижении приемника и может вызывать интерференционные эффекты.

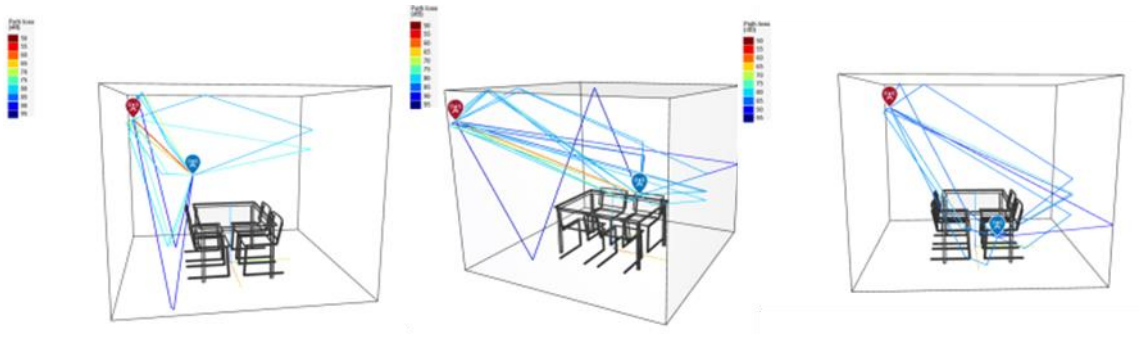


Рис. 2. Пути прохождения лучей для трех вариантов расположения устройств

На рисунке 3 представлено распределение уровней и временных задержек приходящих сигналов. Как можно заметить, не всегда сигнал с наименьшей задержкой обладает наибольшим уровнем мощности. Это особенно заметно в сценарии распространения сигнала без прямой видимости (NLOS – Non-line-of-sight propagation). Важно отметить, что график не отображает фазу приходящего сигнала, которая может как улучшать, так и ухудшать качество сигнала при наложении сигналов от различных лучей.

Для повышения наглядности оценки вероятности ошибки в процессе передачи данных необходимо включить ключевые параметры системы. В качестве метода модуляции был использован квадратурная амплитудная модуляция с 64 точками (КАМ-64). Для уплотнения спектра применялась ортогональная частотная модуляция (OFDM) с 256 поднесущими. В качестве блочного кода использовался код Галлагера, а также различные конфигурации антенных массивов. В результате были сформированы сигнальные созвездия и определена зависимость вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума (Eb/N0).

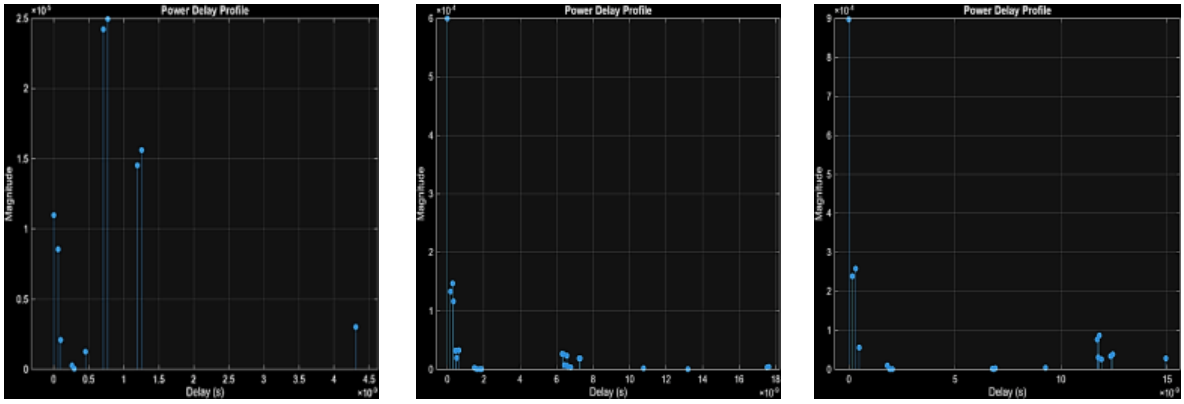


Рис. 3. Задержки прихода лучей и их уровень

На рисунках 4 и 5 представлены сигнальные созвездия, иллюстрирующие три различных сценария расположения приемника и передатчика для двух типов размерности антенн. Анализ данных изображений позволяет констатировать, что при уменьшении размерности антенн и, соответственно, сокращении числа пространственных потоков, наблюдается снижение отклонения принимаемых сигналов от эталонных значений, что, в свою очередь, приводит к уменьшению вероятности ошибки (рисунки 6 и 7). Кроме того, наглядно демонстрируется значительное увеличение вероятности ошибки при использовании непрямого распространения сигнала (NLOS) по сравнению с прямым распространением (LOS).

Следует отметить, что при незначительных расстояниях между приемным и передающим устройствами, приемник может оказаться в области ближней зоны, что приведет к существенному ухудшению качества сигнала. Это особенно заметно на первых двух графиках рисунка 5, где более короткий путь, представленный на первом графике, демонстрирует большее отклонение от исходных точек созвездия. В связи с этим сравнение параметров сигнала между сценариями LOS и NLOS следует проводить между 2 и 3 случаями.

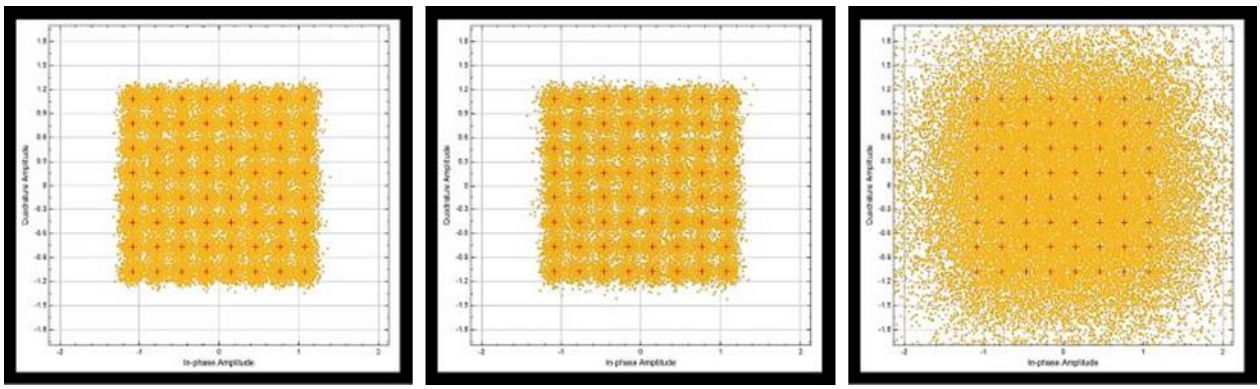


Рис. 4. Сигнальные созвездия при размерности антенн 4

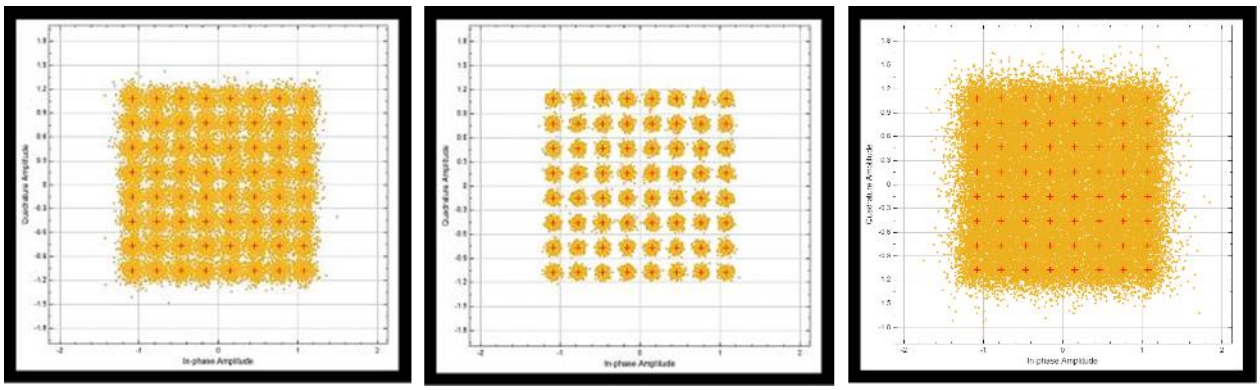


Рис. 5. Сигнальные созвездия при размерности антенн 2

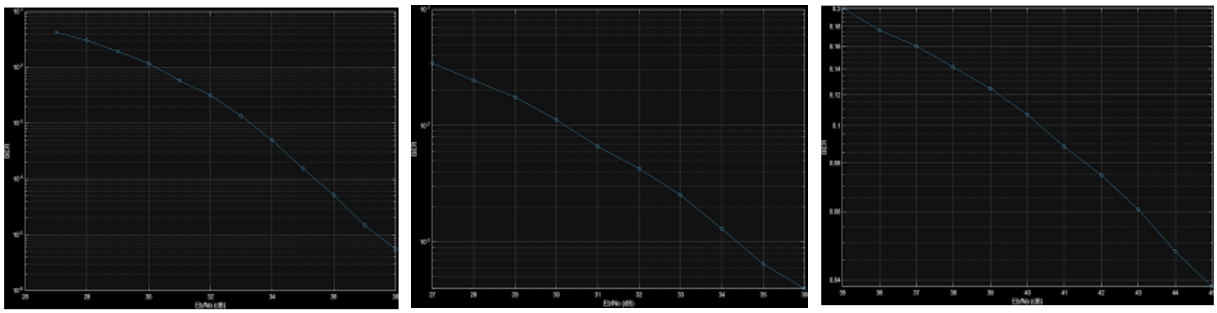


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум на бит при размерности антенн 4

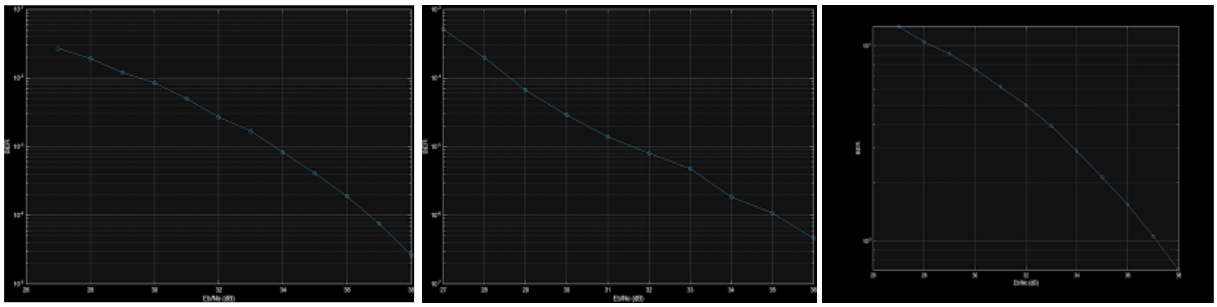


Рис. 7. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум на бит при размерности антенн 2

Из рисунков 5 и 6 видно, что вероятность ошибки значительно возрастает с $4 \cdot 10^{-4}$ до 0,2 при постоянном значении отношения Eb/N0, равном 35 дБ. Это обуславливается существенными потерями энергии при каждом переотражении сигнала, учитывая, что на всех исследуемых путях наблюдалось два отражения (рис. 2).

Сравнение различных конфигураций антенных систем показывает, что при переходе от четырехэлементной к двухэлементной конфигурации MIMO наблюдается значительное снижение вероятности ошибки на несколько порядков. В сценарии LOS при четырехэлементной конфигурации вероятность ошибки составляет $4 \cdot 10^{-4}$, а при двухэлементной конфигурации

она уменьшается до $1 \cdot 10^{-6}$. Аналогично, в сценарии NLOS вероятность ошибки снижается с 0,2 до 0,02.

В сценариях NLOS при всех исследованных конфигурациях антенных систем вероятность ошибки остается чрезмерно высокой для обеспечения надежной связи при неизменном значении отношения Eb/N0. Для компенсации данного эффекта необходимо применять соответствующие меры, такие как снижение размерности модуляции, увеличение излучаемой мощности передатчика или использование дополнительных методов компенсации [4].

Список используемых источников

1. Yun Z., Iskander M. F. Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications // IEEE access. 2015. Т. 3. С. 1089-1100.

2. Львович Я. Е. и др. Исследование метода трассировки лучей. 2011.

3. Wang A., Yin R., Zhong C. Channel estimation for uniform rectangular array based massive MIMO systems with low complexity // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Т. 68. № 3. С. 2545-2556.

4. Yusof S. K. S., Zamani A. I. A. Intercarrier interference self-cancellation for space-time-frequency MIMO-OFDM system // 2008 IEEE International RF and Microwave Conference. IEEE, 2008. С. 520-523.

MIMO-OFDM SIGNAL ANALYSIS USING RAY TRACING

Bobrovskii A., Simonina O.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article presents the results of modeling the behavior of a MIMO-OFDM signal in a closed space using the Ray Tracing method. The article explores the characteristics of the signal, such as propagation losses and bit error rates, as the beam path from the transmitter to the receiver changes. The article also discusses the degradation of signal quality when using non-line-of-sight paths compared to line-of-sight paths, and the changes in signal characteristics when the antenna arrays of the receiver and transmitter are modified. The article demonstrates the increased requirements for the Eb/No ratio to maintain the desired signal parameters when using non-line-of-sight beam paths.

Key words: MIMO, OFDM, Ray-Tracing. BER, Radio Propagation

УДК 621.396
ГРНТИ 47.14

РАЗРАБОТКА TINYML-МЕТОДА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СВЕРХПЛОТНОЙ СЕТЬЮ КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ И МЕТАВСЕЛЕННОЙ

А. Ю. Брюшинин, А. Н. Волков, О. П. Второв, В. В. Дмитриева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

С каждым годом достижения в области машинного обучения открывают для разработчиков новые возможности. В данной статье представлен подход анализа данных в режиме реального времени на основе Tiny Machine Learning (TinyML). Применение TinyML позволит классифицировать движения человека на основе данных трехосевого акселерометра и гироскопа. Такой подход впервые предложен для применения в костюме телеприсутствия с целью повышения энергоэффективности в условиях высокой плотности пользователей и сенсорных устройств. Локальная обработка сигналов и распознавание движений на встроенных микроконтроллерах снижает необходимость в постоянной передаче данных по беспроводным каналам и существенно уменьшает энергопотребление системы. Результаты экспериментов демонстрируют потенциал применения TinyML для разработки и использования устройств в сверхплотных сетях при минимальных вычислительных ресурсах.

TinyML, метавселенная, сверхплотные сети

Согласно озвученной специальной фокус-группой Международного Союза Электросвязи (агентства ООН) по метавселенным тезис, что следующая эра сети и услуг будет представлена мультивселенной (совокупностью национальных, частных и других метавселенных), стал претворяться в жизнь. Ожидается, что технологии мультивселенной, например такие как: сети цифровых двойников, аватары, костюмы телеприсутствия, цифровые активы и цифровые навыки, позволят качественно преодолеть те разрывы, в том числе и глобальные, которые существуют на данный момент и определены в группе целей устойчивого развития (ЦУР) ООН. Уже на данный момент, кроме существования самой резолюции 105 Всемирной Ассамблеи Стандартизации Электросвязи (ВАСЭ-24), существует более десяти проектов стандартов МСЭ-Т в 21 исследовательской комиссии, 11 исследовательской комиссии, покрывающие вопросы цифровых двойников, аватаров, структуры метавселенной, проблемы совместимости между вселенными, а также совместимости костюмов телеприсутствия [1-2].

В сетях связи новых поколений ужесточаются требования по качеству обслуживания, поэтому применение новых технологий и внедрение алгоритмов искусственного интеллекта или машинного обучения является важной задачей [3-4]. В данной статье рассмотрена возможность внедрения машинного обучения в микроконтроллер ESP32 с целью оптимизации беспроводной нательной сети с динамическим выбором датчиков движения. Используя TinyML (Tiny machine learning) возможно реализовать алгоритм в устройствах Интернета вещей. Преимущества TinyML заключается в быстром развертывании сети в реальном времени без облака прямо на устройстве [5]. В рамках предлагаемого сценария в этой работе рассмотрим схему подключения датчиков. Система состоит из сенсоров, размещенных на ключевых мышцах, которые участвуют в движениях рук.

Архитектура такой системы представляет собой многоуровневую систему сбора и обработки данных датчиков на базе микроконтроллеров ESP32 с локальным выполнением моделей tinyML и последующей передачей информации во внешнюю инфраструктуру по протоколу MQTT. В центре схемы (рис. 1) расположен основной модуль с микроконтроллером ESP32, выполняющий сбор потоков данных от всех периферийных узлов, их временную синхронизацию и предварительную обработку. На этом же микроконтроллере развернуты облегченные модели машинного обучения, реализующие функции локальной классификации жестов и анализа состояния пользователя при ограниченных вычислительных ресурсах. Отдельный канал предусмотрен для подключения электромиографических и прочих биосенсоров, сигналы которых также поступают на центральный узел обработки.

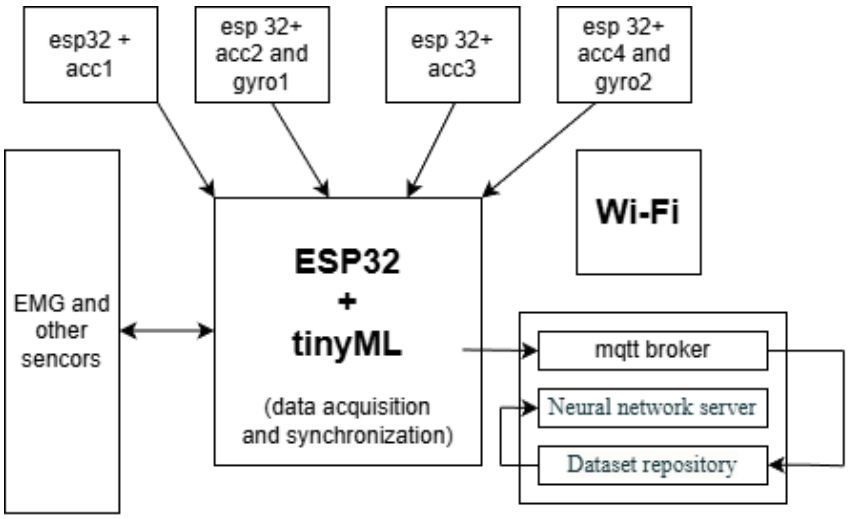
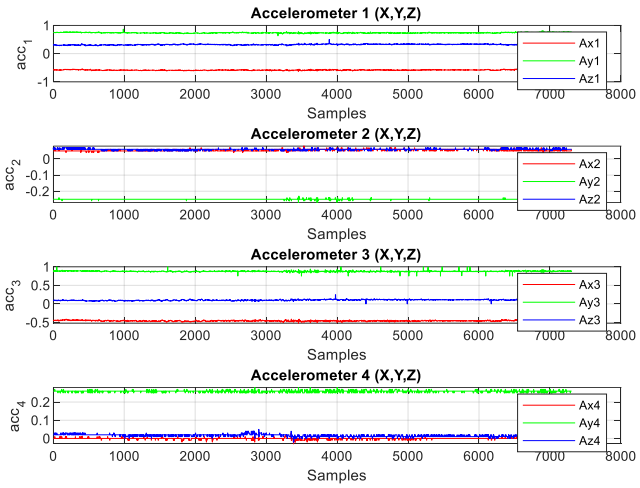


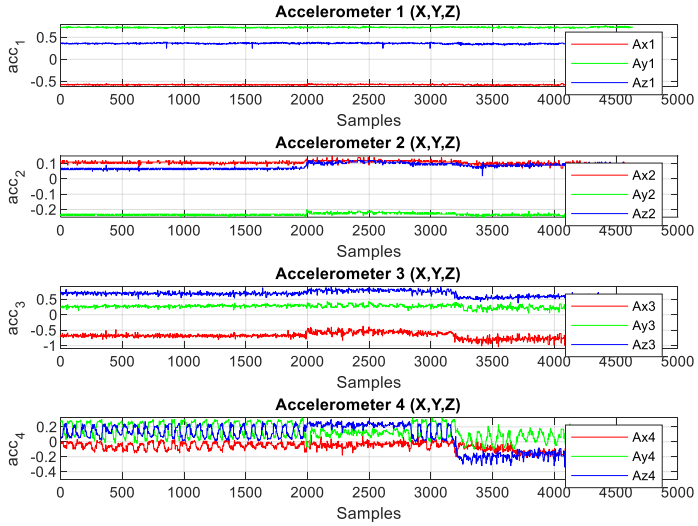
Рис. 1. Зависимость времени передачи от ширины полосы и уровня сигнала

С целью обучения модели выбраны четыре платы с 4 акселерометрами и 2 гироскопами. Дело в том, что для классификации жестов не требуется полная реконструкция позы всего тела, достаточно устойчивых отличимых паттернов во времени по нескольким осевым каналам. Например, один 3-осевой гироскоп дает трехмерный временной ряд, который уже избыточен для простых жестов; добавление второго гироскопа дает 6-мерный ряд, которого достаточно для отделения некоторых простых жестов. Полученные сырые данные 3-осевых акселерометров изображены на рисунке 2.

Рассмотрим пример движения и изменения данных, полученных с акселерометра и гироскопа. Данные акселерометра изменяются при разгибательном и сгибательном движениях (рис. 2). Прибор фиксирует заметное изменение амплитуды сигнала при совершении движения.



а



б

Рис. 2. Данные акселерометра при сгибании локтя: а) спокойное состояние б) действие

Также представлены данные для двух гироскопов (рис. 3). Для классификации жестов рук выбраны 2 гироскопа, поскольку один 3-осевой гироскоп на кисти и один на предплечье позволяют восстановить относительное вращение сегментов и угловую скорость, которые задают форму жеста (сгибание, вращение, отведение и т.п.). Кроме того, расширение конфигурации датчиков за счет дополнительных гироскопов может привести к росту энергопотребления и трафика без существенного прироста точности данных.

Также на примере движения локтя гироскоп 1 не фиксирует движение, поскольку он расположен на мышце спины, а гироскоп 3 расположен на предплечье и фиксирует значения с резкими изменениями амплитуд (рис. 3).

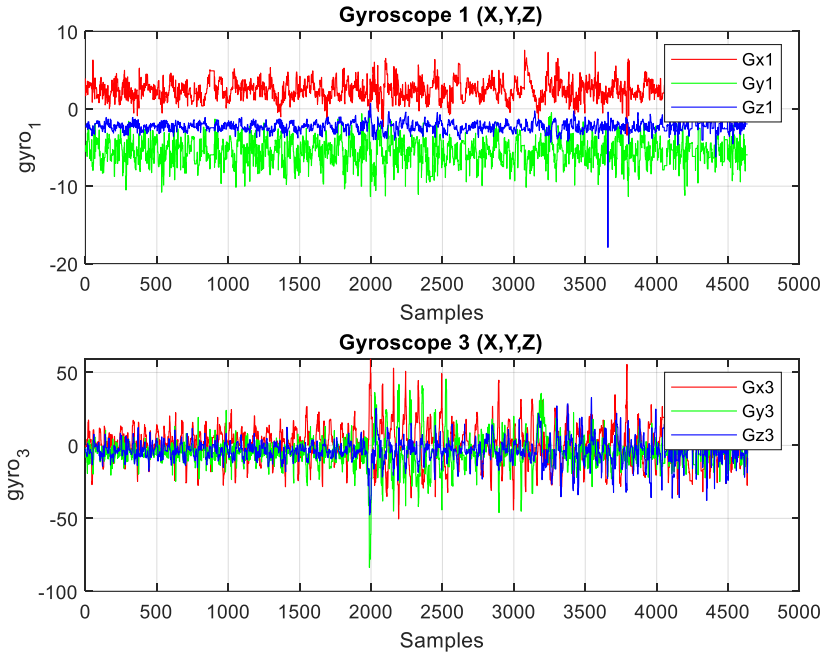


Рис. 3. Данные гироскопов при движении

Заключение. Полученные результаты доказывают возможность и актуальность применения машинного обучения на микроконтроллерах, особенно перспективно в системах с низкими энергопотреблением и минимальными задержками. Более того, возможность совмещения результатов статьи с электромиографическими сенсорами, которые регистрируют мышечные сокращения задает новый вектор исследований. Такое интегрированное решение открывает путь к созданию компактных нательных сенсоров, например, для костюма телеприсутствия. Возможность управления аватаром в виртуальной среде с минимальными

задержками и без необходимости привлечения высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры.

Список используемых источников

1. TU-T Focus Group Technical Report FGMV-32. Overview of metaverse. 2023. 118 p.
2. ITU-T Focus Group Technical Report FGMV-20. Definition of metaverse. 2023. 24 p.
3. Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A. Fifth generation communication networks: on the way to networks 2030 // Telecom IT. 2020. Vol. 8. № 2. PP. 32–43.
4. Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. AI/machine learning for ultra-reliable low-latency communication // ITU News Magazine. 2020. № 5. PP. 65–68.
5. Sanchez-Iborra R., Skarmeta A. F. Tinyml-enabled frugal smart objects: Challenges and opportunities // IEEE Circuits and Systems Magazine. 2020. Vol. 20. № 3. PP. 4-18.

DEVELOPMENT OF TINYML, A METHOD OF INTERACTION BETWEEN THE ULTRA-DENSE NETWORK OF THE TELEPRESENCE SUIT AND THE METAVERSE

Bryushinin A., Volkov A, Vtorov O, Dmitrieva V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Every year, advances in machine learning open up new opportunities for developers. This article presents a real-time data analysis approach based on Tiny Machine Learning (TinyML). The use of TinyML will make it possible to classify human movements based on data from a three-axis accelerometer and gyroscope. This approach has been proposed for the first time for use in a telepresence suit in order to increase energy efficiency in conditions of high density of users and sensor devices. Local signal processing and motion recognition on embedded microcontrollers reduces the need for continuous data transmission over wireless channels and significantly reduces system power consumption. The experimental results demonstrate the potential of using TinyML for the development and use of devices in ultra-dense networks with minimal computing resources.

Key words: TinyML, the metaverse

УДК 004.932
ГРНТИ 28.23.15

МЕТОД КАЛИБРОВКИ И ПРОГРАММНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЛАТЕРАЛЬНОЙ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ЦВЕТОКОРРЕКЦИИ В СИСТЕМАХ СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А. Н. Бучатский, Д. Д. Кузьмина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Качество изображения внешних камер в системах смешанной реальности влияет на визуальное восприятие и устойчивость алгоритмов трекинга. Одной из причин деградации качества является латеральная хроматическая аберрация, проявляющаяся как межканальное смещение на контрастных границах и усиливающаяся к краям кадра. В работе реализован метод оценки пространственно-зависимых смещений каналов R и B относительно канала G по изображению шахматной мишени с использованием фазовой корреляции по картам градиентов с последующей интерполяцией и компенсацией аберрации ремаппингом. Эффективность метода показана на реальных и синтетических данных.

смешанная реальность, сквозное видео, калибровка камеры, латеральная хроматическая аберрация, фазовая корреляция, компенсация аберраций

Системы смешанной реальности используют видеопотоки внешних камер для формирования изображений сквозного видео (англ. passthrough), трекинга положения пользователя и объектов, а также для корректного совмещения виртуальных элементов с реальной сценой [1, 2]. Поэтому качество исходного изображения важно как для визуального восприятия, так и для последующей обработки: артефакты на границах объектов ухудшают детекцию признаков, снижают устойчивость трекинга и могут приводить к заметным ошибкам совмещения и окклюзий [3-6].

Одной из причин возникновения артефактов на границах является латеральная хроматическая аберрация (ЛХА) – зависимое от координат кадра несовпадение изображений в разных спектральных диапазонах. В цифровом RGB-изображении ЛХА проявляется как смещение каналов R, G и B друг относительно друга, наиболее заметное на контрастных переходах и, как правило, возрастающее по мере удаления от центра кадра [3]. В настоящей работе рассматривается вычислительный подход, позволяющий по калибровочному изображению оценить пространственно-зависимые межканаль-

ные смещения и применить компенсацию ЛХА, что может использоваться как этап предобработки изображений камер MR-систем перед трекингом и визуализацией сквозного видео.

Пусть задано RGB-изображение $I(x,y) = \{R(x,y), G(x,y), B(x,y)\}$ полученное без автоматической коррекции аберраций. Латеральная хроматическая аберрация проявляется как пространственно-зависимое смещение каналов, поэтому модель представим в виде векторных полей смещений $\Delta_R(x,y) = (\Delta_{x_R}, \Delta_{y_R})$ и $\Delta_B(x,y) = (\Delta_{x_B}, \Delta_{y_B})$ относительно опорного канала G. Требуется оценить Δ_R, Δ_B по калибровочному изображению и выполнить компенсацию, приводя R и B к геометрии G.

Для устойчивого сопоставления каналов используются карты градиентов, так как ЛХА наиболее заметна на границах. Для каждого канала вычисляется модуль градиента с помощью оператора Sobel [5]:

$$M_C(x,y) = \sqrt{(S_x(C))^2 + (S_y(C))^2}, C \in \{R,G,B\}.$$

Изображение делится на сетку перекрывающихся окон размера $\omega \times \omega$ с шагом s. Для каждого окна k вычисляется сдвиг между фрагментами M_G и M_R, а также между M_G и M_B, методом фазовой корреляции [1], обеспечивающим субпиксельную оценку сдвига:

$$(\delta x_{R,k}, \delta y_{R,k}) = PhaseCorr(M_G^k, M_R^k),$$

$$(\delta x_{B,k}, \delta y_{B,k}) = PhaseCorr(M_G^k, M_B^k).$$

Окна с низким значением отклика фазовой корреляции и сдвигами, превышающими заданный предел, не учитываются. Результатом этапа является набор точек (x_k, y_k) и соответствующих локальных смещений для каналов R и B.

Поскольку ЛХА изменяется по полю кадра плавно, локальные оценки интерполируются на всю область изображения. Для каждого из четырех полей $\Delta_{x_R}, \Delta_{y_R}, \Delta_{x_B}, \Delta_{y_B}$ выполняется интерполяция по нерегулярной сетке (например, кубическая), а на участках, где интерполяция не определена, применяется ближайшее значение. Полученные плотные карты смещений используются как калибровочный профиль ЛХА для данной оптики и режима съемки.

Компенсация выполняется геометрическим преобразованием каналов R и B (канал G остается неизменным). Для каждого пикселя (x,y) вычисля-

ется значение исправленного канала как значение исходного канала в смещенной координате:

$$R'(x,y) = R\left(x + \Delta_{x_R}(x,y), y + \Delta_{y_R}(x,y)\right),$$
$$B'(x,y) = B\left(x + \Delta_{x_B}(x,y), y + \Delta_{y_B}(x,y)\right),$$

где значение в нецелых координатах определяется интерполяцией (бикубической) [5], а выход за границы обрабатывается отражением по краю. Исправленное изображение формируется как:

$$I'(x,y) = \{R'(x,y), G(x,y), B'(x,y)\}.$$

Для количественной оценки используются два показателя:

1. Метрика цветной окантовки на границах.

По каналу G строится маска контуров $E(x,y)$ (по порогу модуля градиента). Далее на этих пикселях вычисляются средние значения $|R - G|$ и $|B - G|$ до и после коррекции. Снижение этих величин соответствует уменьшению цветных окантовок на границах.

2. Остаточное межканальное смещение.

На наборе окон дополнительно оценивается модуль остаточного сдвига между градиентами G и R, G и B методом фазовой корреляции; сравниваются среднее значение и 95-й перцентиль до и после коррекции.

Эксперименты выполнены на изображении шахматной мишени, снятом при фокусном расстоянии 16 мм на камеру Sony FX-3 с объективом Sony FE 16–35mm f/2.8 GM при диафрагме f/2.8 [4]. Смещения каналов R и B относительно опорного канала G оценивались по сетке окон методом фазовой корреляции по картам градиентов, далее интерполировались в плотные карты смещений $\Delta_R(x,y)$ и $\Delta_B(x,y)$. Компенсация ЛХА выполнялась ремаппингом каналов R и B по найденным картам смещений.

Для подтверждения с известной “истиной” дополнительно использовалась синтетическая генерация MR-подобной ЛХА на основе того же изображения (16 мм). При генерации сохранялись истинные карты смещений (ground truth), что позволило оценить точность восстановления полей смещений и отделить ошибки метода от особенностей реальной оптики и условий съемки.

На реальных данных эффект выражен слабо, что ожидаемо для высококачественной оптики, однако количественные метрики демонстрируют

уменьшение межканального рассогласования и цветной окантовки на границах.

Таблица 1 содержит значения метрики цветной окантовки на границах (средние значения $|R - G|$ и $|B - G|$ по маске контуров), а также остаточного межканального смещения (среднее и 95-й перцентиль модуля сдвига, оцененного фазовой корреляцией по окнам) до и после коррекции.

ТАБЛИЦА 1. Результаты на реальных данных (16 мм), до и после коррекции ЛХА.

Метрика	До коррекции	После коррекции
Среднее |R − G| на границах	0.028	0.026
Среднее |B − G| на границах	0.0141	0.0135
Средний остаточный сдвиг G–R, px	0.085	0.07
95-й перцентиль остаточного сдвига G–R, px	0.2	0.19
Средний остаточный сдвиг G–B, px	0.07	0.06
95-й перцентиль остаточного сдвига G–B, px	0.17	0.14

На рис. 1 показан фрагмент изображения, выбранный в области, близкой к краю кадра, где проявления ЛХА наиболее вероятны. После коррекции, согласно числовым данным, наблюдается уменьшение цветной окантовки вдоль контрастной границы, но при этом невидимое глазу.



Рис. 1. Фрагмент у края кадра до и после коррекции ЛХА (выбран участок с максимальной цветной окантовкой)

Для проверки корректности восстановления полей смещений использовалась синтетическая модель ЛХА, отражающая типичное поведение компактной широкоугольной оптики: рост смещения к периферии, различная амплитуда для каналов R и B, а также малая асимметрия и тангенциальная компонента [3]. Поскольку при генерации известны истинные карты смещений, оценивалась ошибка восстановления Δ_R и Δ_B (с учетом того, что при

коррекции должно применяться обратное смещение относительно внесенного при генерации).

Таблица 2 показывает эффект коррекции на синтетических данных по тем же метрикам, что и для реального изображения: остаточное межканальное смещение и метрика цветной окантовки на границах.

ТАБЛИЦА 2. Результаты на синтетических данных (16 мм), до и после коррекции ЛХА.

Показатель	До коррекции	После коррекции
Средний остаточный сдвиг G–R, px	0.95	0.21
95-й перцентиль остаточного сдвига G–R, px	1.99	0.61
Средний остаточный сдвиг G–B, px	1.46	0.26
95-й перцентиль остаточного сдвига G–B, px	3.55	0.73
Среднее $\|R - G\|$ на границах	0.08	0.03
Среднее $\|B - G\|$ на границах	0.109	0.026

Помимо численных метрик, эффект компенсации подтверждается визуально. На рис. 2 показан фрагмент синтетического изображения до и после коррекции; после применения оцененных карт смещения наблюдается уменьшение межканального рассогласования на контрастных границах.

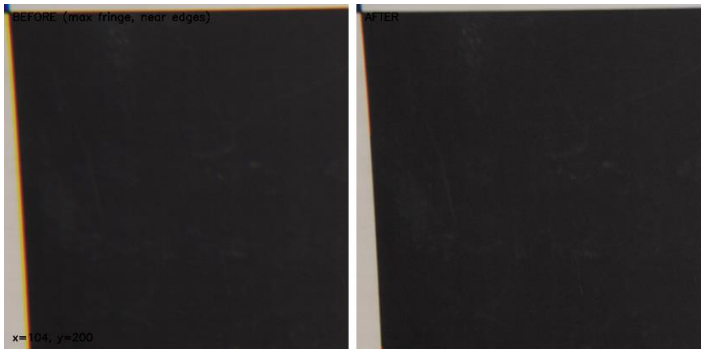


Рис. 2. Синтетические данные (16 мм): фрагмент изображения до и после компенсации ЛХА (MR-подобная модель)

Точность восстановления полей смещений оценивалась сравнением оцененных и истинных карт (на периферийной области кадра). Среднеквадратичная ошибка составила 0.589 px для Δ_{x_R}, 0.393 px для Δ_{y_R}, 0.672 px для Δ_{x_B} и 0.634 px для Δ_{y_R}; значения 95-го перцентиля ошибки находятся в диапазоне 0.83–1.03 px. На рис. 3–4 приведены примеры истинных карт смещений, оцененных карт и карты абсолютной ошибки.

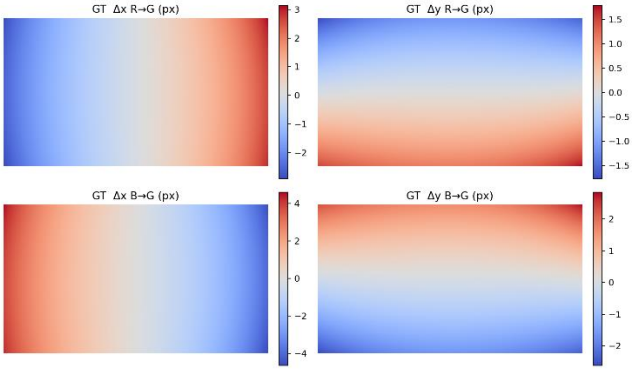


Рис. 3. Истинные карты смещений каналов (синтетическая ЛХА)

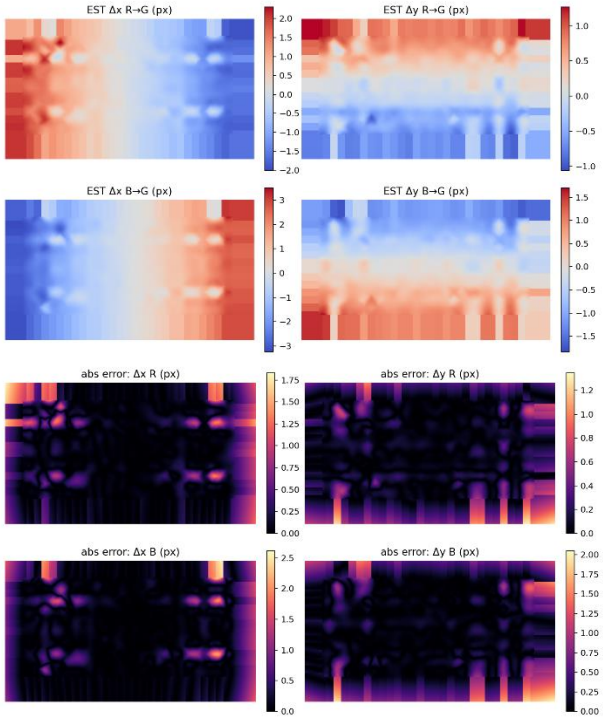


Рис. 4. Оцененные карты смещений и карта ошибки относительно истинной карты смещений

В работе предложен и реализован метод компенсации латеральной хроматической аберрации, основанный на оценке межканальных смещений каналов R и B относительно опорного канала G по картам градиентов и фазовой корреляции с последующей интерполяцией смещений в плотные карты и ремаппингом каналов. Эксперименты на реальном изображении шахматной мишени, снятом на Sony FX-3 с объективом Sony FE 16–35mm f/2.8 GM при 16 мм и f/2.8, показали уменьшение метрики цветной окантовки на границах и снижение остаточного межканального рассогласования. Подтверждение на синтетических данных с заданной MR-подобной моделью ЛХА подтвердила работоспособность подхода: после коррекции существенно уменьшаются остаточные сдвиги между каналами и значения метрики цвет-

ной окантовки, а сравнение с истинной картой смещений (ground truth) демонстрирует приемлемую точность восстановления карт смещений. Дальнейшее развитие работы может включать более устойчивую интерполяцию в областях с малым числом контуров, а также расширение модели на продольную (аксиальную) хроматическую аберрацию и совместную коррекцию с дисторсией.

Список используемых источников

1. Kuglin C. D., Hines D. C. The Phase Correlation Image Alignment Method // Proc. IEEE International Conference on Cybernetics and Society. 1975. URL: http://boutigny.free.fr/Astronomie/AstroSources/Kuglin-Hines.pdf (дата обращения: 14.02.2026).

2. Reddy B. S., Chatterji B. N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration // IEEE Transactions on Image Processing. 1996. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/506761 (дата обращения: 14.02.2026).

3. Brown D. C. Decentering distortion of lenses // Photogrammetric Engineering. 1966. URL: http://close-range.com/docs/Decentering_Distortion_of_Lenses_Brown_1966_may_444-462.pdf (дата обращения: 15.02.2026).

4. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration (дата обращения: 15.02.2026).

5. Гонзалес Р. С., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. 4-е изд. М.: Техносфера, 2018. 1168 с.

6. Бучатский А. Н., Кузьмина Д. Д. Проблема восприятия метамерных пар при наложении виртуальных объектов на реальные: новые подходы к повышению качества визуализации // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025). 2025. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82585262&selid=82585278 (дата обращения: 15.02.2026).

METHOD OF CALIBRATION AND PROGRAM COMPENSATION OF LATERAL CHROMATIC ABERRATION FOR COLOR CORRECTION IN MIXED REALITY SYSTEMS

Buchatsky A., Kuzmina D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The image quality of external cameras in mixed reality systems affects the visual perception and stability of tracking algorithms. One of the reasons for the degradation of image quality is lateral chromatic aberration, which manifests itself as inter-channel displacement on contrasting boundaries and increases towards the edges of the frame. This paper presents a method for estimating the spatially-dependent displacements of the R and B channels relative to the G channel using phase correlation based on gradient maps, followed by interpolation and aberration compensation using remapping. The effectiveness of the method has been demonstrated on real and synthetic data.

Key words: mixed reality, end-to-end video, camera calibration, lateral chromatic aberration, phase correlation, and aberration compensation

УДК 534.631
ГРНТИ 29.37.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОСТЕЙШЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОБСТВЕННЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ В МЕМБРАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

А. Н. Бучатский, К. Е. Тафинцев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлены результаты экспериментальной проверки простейшей математической модели, описывающей собственные частоты колебаний (моды) мембранной акустической системы типа. Модель основана на волновом уравнении для прямоугольной мембраны с жестко закрепленными краями. Измерения выполнялись в ближнем поле в двух характерных точках: в центре и в углу панели. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных значений частот первых шести мод.

мембранная акустика, резонансные частоты, моделирование, акустические измерения

Мембранные акустические системы (Distributed Mode Loudspeakers, DML) находят все более широкое применение благодаря способности создавать равномерное звуковое поле и высокому КПД [1]. Однако проектирование таких систем сопряжено со сложностью точного прогнозирования их акустических характеристик, в частности, резонансных частот. Целью данной работы является верификация простейшей математической модели, описывающей собственные частоты колебаний (моды) DML-панели, путем сравнения с экспериментальными данными, полученными в программе Room EQ Wizard (REW).

Колебания такой идеальной мембраны описываются двумерным волновым уравнением. Рассматриваемый диапазон мод: от (1,1) до (3,2) включительно. Ограничение рассмотрения первыми шестью модами обусловлено тем, что на более высоких частотах модель идеальной мембраны становится менее адекватной, и необходимо учитывать жесткость материала на изгиб, а также изменение скорости распространения изгибных волн с увеличением частоты.

В качестве базовой принята модель прямоугольной мембраны с жестко закрепленными краями. Собственные частоты колебаний рассчитываются по формуле:

$$f = \left(\frac{c}{2}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2},$$

где L_x и L_y – линейные размеры исследуемой панели Tefra Lascar [2] (таблица 1), с = 100 м/с – эффективная скорость волны, подобранная для наилучшего совпадения в исследуемом диапазоне частот, m и n – индексы мод, соответствующие количеству полуволн по длине и ширине панели.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики мембраны

Длина	550 мм
Ширина	300 мм
Толщина	3 мм
Материал	Алюминий

Экспериментальные исследования проводились с использованием программного обеспечения REW версии 5.31.3 [3]. Схема измерительного тракта включала:

– объект исследования – DML-панель Tefra Lascar;
– звуковая карта – Focusrite Scarlett 2i2 (2-го поколения), частота дискретизации 48 кГц, разрядность 24 бита;
– микрофон – Shure SM58 (динамический, суперкардиоида);
– усилитель – Sabaj A10A (THD+N: 0.0045 %, SNR: 98 дБ).

Измерения проводились в ближнем поле (расстояние до поверхности панели ~5 см) для минимизации влияния акустики помещения [4]. Микрофон устанавливался в двух характерных точках: в геометрическом центре панели и в ее углу. Такая методика позволяет наблюдать моды с различным положением узлов и пучностей [5]. В каждой точке выполнялось три последовательных измерения с последующим усреднением для снижения случайной погрешности. Программа REW при генерации логарифмического свип-сигнала длиной 256k выборок обеспечивает высокое частотное разрешение, достаточное для точного определения положения резонансных пиков. Пе-

ред измерениями в REW выполнена калибровка звуковой карты Focusrite Scarlett 2i2 путем прямого соединения выхода со входом – полученная АЧХ тракта оказалась равномерной с отклонениями менее 0.5 дБ. Микрофон Shure SM58 имеет паспортную чувствительность 1.85 мВ/Па и равномерную характеристику в диапазоне 50-15000 Гц. Усилитель Sabaj A10a характеризуется коэффициентом нелинейных искажений THD+N = 0.0045 % и отношением сигнал/шум 98 дБ, что позволяет пренебречь его влиянием на результаты.

В результате измерений были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) панели. На рисунке 1 представлена АЧХ, измеренная в углу панели, где в соответствии с теорией возбуждаются большая часть мод колебаний.

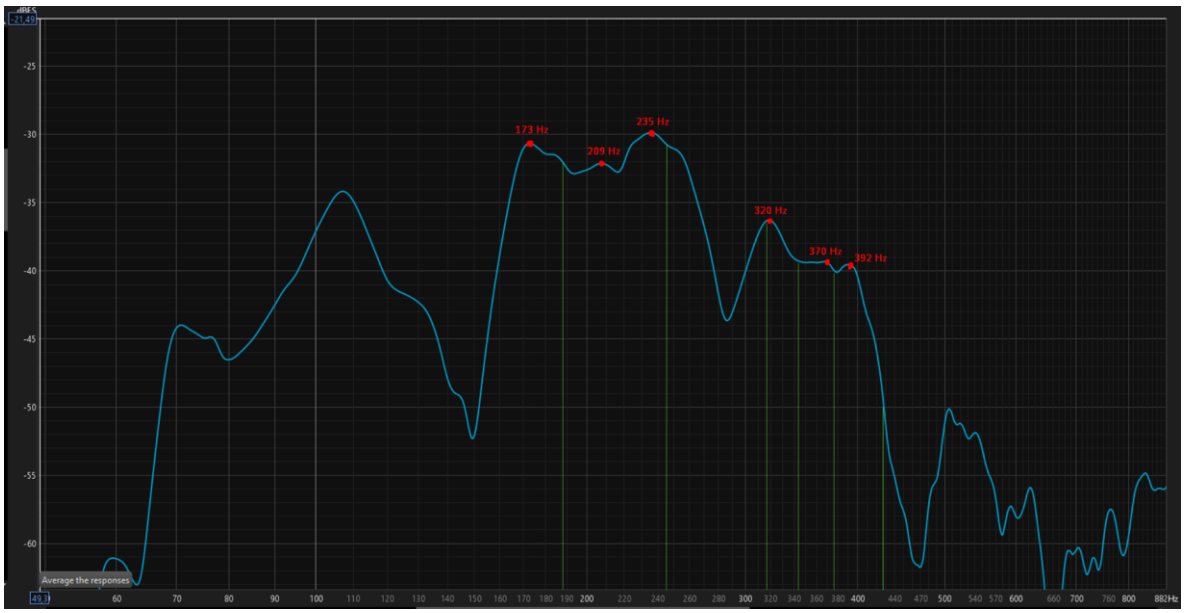


Рис. 1. АЧХ DML-панели в угловой точке

Расхождения расчетных и измеренных резонансных частот объясняются частотной зависимостью скорости изгибных волн, а так же сильного влияния краевых условий в углу пластины. Красными точками обозначены измеренные резонансные частоты, вертикальными зелеными линиями обозначены расчетные резонансные частоты.

На рисунке 2 представлена АЧХ, измеренная в центре панели.

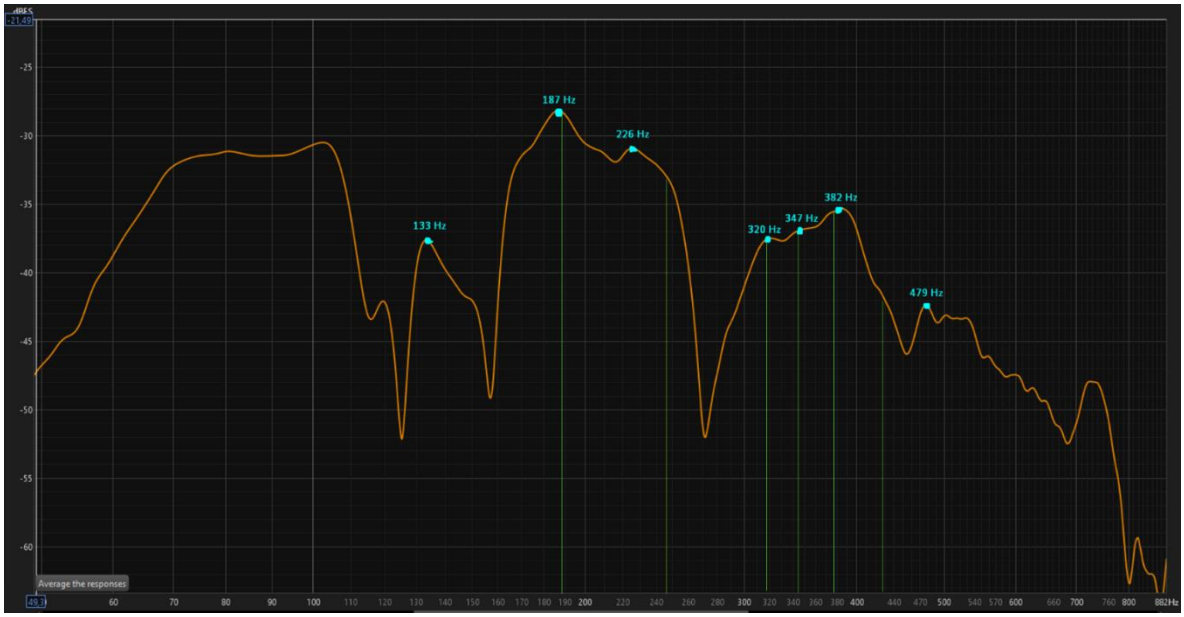


Рис. 2. АЧХ DML-панели в центре

Значения, измеренные в центре панели имеют значительно меньшее расхождение с расчетными, чем в случае измерений в углу. Центральная точка отражает глобальную динамику панели, тогда как угловая область чувствительна к локальным эффектам, демпфированию и неоднородности конструкции.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений резонансных частот сведено в таблицу 2.

ТАБЛИЦА 2. Значения резонансных частот

Мода	Модель (расчетное значение в Гц)	Угол (измеренное значение в Гц)	Центр (измеренное значение в Гц)	Ошибка (Угол)	Ошибка (Центр)
1.1	189	173	187	9 %	1 %
2.1	246	209	226	15 %	8 %
1.2	319	235	320	26 %	0.3 %
2.2	345	320	347	7 %	0.6 %
3.1	379	370	382	2 %	0.8 %
3.2	430	392	479	9 %	11 %

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы: в центре панели наблюдается лишь четыре ярко выраженных пика, соответствующих модам (1,1), (1,2), (2,2) и (3,1). Моды (2,1) и (3,2) в центре практически не видны, что полностью соответствует теории колебаний: в центре у этих мод расположен узел, и микрофон их не регистрирует. В угловой точке зафиксированы все шесть исследуемых мод. Наибольшее расхождение наблюдается для моды (2,1) в угловой точке (около 15 %). Это объясняется тем, что реальная панель является не идеальной мембраной, а упругой пластиной, в которой распространяются изгибные волны. Фазовая скорость таких волн зависит от частоты, в то время как в модели она принята постоянной [6]. Также сказывается демпфирующее действие резинового подвеса по краям панели, которое по-разному влияет на моды с различной формой колебаний.

В результате работы проведена экспериментальная верификация простейшей математической модели собственных мод колебаний для DML-панели. В области частот ниже 150 Гц на экспериментальных АЧХ наблюдаются дополнительные пики, не соответствующие расчетным модам панели. Их происхождение может быть связано с комнатными резонансами, поршневым режимом работы панели ниже частоты первой моды, а также собственными резонансами возбудителя и элементов конструкции. Простая мембранная модель с закрепленными краями показала высокое совпадение с экспериментом, так как низшие моды определяются по большей части геометрией и граничными условиями, а не локальной структурой материала. Более высокие расхождения в угловой области связаны с краевыми эффектами и локальными неоднородностями. Выявленные расхождения (до 15 %) указывают на необходимость усложнения модели путем учета изгибной жесткости, учета изменения скорости изгибных волн в зависимости от частоты и перехода от мембранного приближения к модели пластины, что является направлением дальнейших исследований.

Список используемых источников

1. Обзор АС с применением технологии громкоговорителей распределенного типа. URL: https://tefra-audio.ru/o-nas-govoryat/obzor-akusticheskoj-sistemy-tefra-audio-nevis-s-primeneniem-tehnologii-gromkogovoritelej-raspredelennogo-tipa (дата обращения: 12.02.2026).

2. Плоская акустическая система, 70 Вт Tefra Lascar. URL: https://hi-tech-media.ru/equipment/akusticheskie-sistemy-tefra/tefra-lascar-potolochnaya-akusticheskaya-sistema-70-vt/ (дата обращения: 12.02.2026).

3. Room EQ Wizard User Manual. URL: https://www.roomeqwizard.com/help/ (дата обращения: 15.02.2026).
4. Бернек Л. Акустические измерения. М.: Мир, 1971. 520 с.
5. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 560 с.
6. Колесников А.Е. Акустические измерения. Л.: Судостроение, 1983. 256 с.

TITLE: EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A SIMPLE MATHEMATICAL MODEL OF NATURAL MODES OF VIBRATION IN A MEMBRANE LOUDSPEAKER SYSTEM

Buchatsky A., Tafintsev K.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The paper presents the results of an experimental verification of a simple mathematical model describing the natural frequencies (modes) of a membrane loudspeaker system of the DML type. The model is based on the wave equation for a rectangular membrane with clamped edges. Measurements were performed in the near field at two characteristic points: at the center and at the corner of the panel. A comparison of calculated and experimental frequency values for the first six modes was performed. It is shown that for modes with an antinode at the center, the error does not exceed 2 %, confirming the model's adequacy. The identified discrepancies for modes with a node at the center indicate the need to account for bending stiffness in further model development.

Key words: DML, bending waves, natural modes, verification, REW, acoustic measurements

УДК 621.39, 530.145
ГРНТИ 47.35.41, 29.35.15

НОВАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ МАГИСТРОВ «ОПТИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ»

М. С. Былина, Г. Р. Бразовский, С. Ф. Глаголев, Е. В. Полякова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В СПбГУТ разработана новая образовательная программа «Оптические и квантовые технологии в инфокоммуникациях» подготовки квалифицированных магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», обладающих широким кругозором, готовых к решению профессиональных и практико-ориентированных задач в области информационно-телекоммуникационных систем нового поколения, обладающих навыками и компетенциями, необходимыми для разработки инновационного оборудования и комплексов для систем оптических и квантовых коммуникаций, а также для проведения научных исследований в этих областях. Разработанная программа согласуется с актуальными задачами экономики РФ, имеет гибкий учебный план, получила поддержку основных работодателей.

квантовые технологии, оптические технологии, образовательная программа, профстандарт

Квантовые технологии сегодня признаны стратегически важным направлением, способным существенно влиять на науку, технику и общество, а руководящие документы страны определяют цели, задачи и механизмы развития этого направления в Российской Федерации для достижения значимых результатов [1-5].

Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии», актуализированная до 2030 года, выделяет три основных направления: квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовые сенсоры и метрологию [1]. Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства» (2025–2030 гг.), нацеленный на технологический суверенитет РФ, включает создание квантовых сетей протяженностью до 15 000 км и разработку квантовых процессоров мощностью до 300 кубитов [2].

Программа фундаментальных научных исследований в РФ [2] направлена на создание квантовых компьютеров, защищенных сетей передачи дан-

ных и высокочувствительных сенсоров. Стратегия развития отрасли связи РФ до 2035 г. предполагает развитие магистральных квантовых сетей (МКС), внедрение квантовых коммуникаций и стимулирование исследований и разработок [4].

Концепция регулирования отрасли квантовых коммуникаций в РФ направлена на развитие рынка квантовых технологий, импортозамещение и обеспечение информационной безопасности. Документ предусматривает создание правовой базы, стандартизацию, поддержку отечественных производителей и внедрение квантовых сетей [5].

В России происходит активное внедрение и полноценное развитие квантовых технологий. На начало 2026 года построено 7858 км квантовых сетей, подключены 11 крупных городов. Обеспечение информационной безопасности с применением квантовых технологий в государственных корпорациях с 06.02.2024 находится на контроле у Комитета Совета Федерации по обороне и безопасности. Реализуется Концепция создания, развития и эксплуатации Межуниверситетской квантовой сети (МУКС) на 2024-2030 годы, принятая в 2024 году во исполнение поручений президента РФ [6].

Мировой рынок квантовых коммуникаций растет среднегодовыми темпами более 30 %. Такая динамика связана со строительством магистральных сетей квантовых коммуникаций, созданием систем квантового распределения ключей и сервисов на их основе в Китае, России, США, Великобритании, Южной Корее и других странах. По данным Research Nester, объем мирового рынка квантовых коммуникаций оценивался на начало 2026 года более чем в 1,21 млрд USD, а к 2034 году составит 22,09 млрд USD [7].

Международным союзом электросвязи проведена работа по стандартизации квантовых сетей распределения ключей (Quantum Key Distribution Network, QKDN). В период с 2020 года до конца 2025 года принято 35 международных стандартов (Y.3800 – Y.3834), относящихся к квантовым сетям [8].

В СПбГУТ на кафедре оптических и квантовых систем связи (ОКСС) квантовые технологии активно внедряются в учебный процесс. Открытие новой образовательной программы «Оптические и квантовые технологии в инфокоммуникациях» приурочено к Международному году квантовой науки и технологии, объявленному ООН к столетию открытия квантовой механики.

Новая программа открыта в рамках направления 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Целью программы является выпуск квалифицированных магистров, обладающих широким кругозором, готовых к решению профессиональных и практико-ориентированных задач

в области информационно-телекоммуникационных систем нового поколения, обладающих навыками и компетенциями, необходимыми для разработки инновационного оборудования и комплексов для систем оптических и квантовых коммуникаций, а также для проведения научных исследований в этих областях.

Программа относится к области профессиональной деятельности «06. Связь, информационные и коммуникационные технологии» и разработана в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом [9] и профессиональными стандартами «Инженер-проектировщик в области связи (телекоммуникаций)» [10] и «Специалист по исследованиям и разработкам в области квантовых коммуникаций» [11]. Выпускники программы готовятся к научно-исследовательской, проектной и технологической видам деятельности и в процессе обучения должны прибрести следующие профильные компетенции:

В научно-исследовательской деятельности:

– способность разрабатывать математические модели исследуемых устройств, систем и процессов в оптических и квантовых инфокоммуникациях;

– способность разрабатывать и применять оптические и квантовые методы обработки, хранения и отображения информации;

– способность предлагать, обосновывать и реализовывать инновационные технические решения для проектируемых систем оптических и квантовых коммуникаций с учетом известных опубликованных экспериментальных и теоретических результатов;

– способность планировать, разрабатывать методики, проводить и обрабатывать результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также формулировать предложения по их использованию для совершенствования оптических и квантовых инфокоммуникационных систем.

В проектной деятельности:

– способность использовать современную элементную базу и схемотехнику для разработки компонентов и устройств оптических и квантовых инфокоммуникационных систем;

– способность формулировать требования и осуществлять обоснованный выбор оборудования и материалов, необходимых для успешной реализации проектов инновационных оптических и квантовых систем, а также осуществлять поиск аналогов проектируемых систем;

– способность разрабатывать и применять прогрессивные методы проектирования, строительства и эксплуатации линейных трактов оптических и квантовых телекоммуникационных сетей.

В технологической деятельности:

– способность анализировать, применять и развивать современные оптические и квантовые технологии.

Для формирования профильных компетенций, предполагающих получение системных знаний, умений и практических навыков, необходимых для профессиональной деятельности, в учебный план включены три блока специальных дисциплин:

– блок инновационных оптических и квантовых технологий включает дисциплины: физические основы квантовых коммуникаций; перспективные оптические и квантовые технологии; оптоинформационные технологии в инфокоммуникациях; теория и практика голографии; основы квантовых вычислений; квантовые коммуникации;

– блок проектирования и исследования оптических и квантовых систем включает дисциплины: компоненты и устройства волоконно-оптических систем передачи; современные DWDM системы; сверхбыстродействующие сигнальные процессоры для цифровой обработки оптических сигналов; проектирование, строительство и эксплуатация оптических и квантовых систем связи; методы и средства измерения параметров оптических телекоммуникационных, квантовых и сенсорных систем;

– блок информационной безопасности включает дисциплины: обеспечение информационной безопасности в информационных сетях; пост-квантовая криптография.

Практические навыки студенты будут получать в учебно-исследовательских лабораториях высокоскоростных DWDM-систем; направляющих систем электросвязи; пассивных оптических сетей; сетей широкополосного абонентского доступа; физических основ оптической связи; фотоники и оптоинформатики; оптических измерительных систем.

В ближайшее время планируется создание лаборатории Квантовых коммуникаций. На кафедре ОКСС разработана программа-имитатор лабораторного комплекса по квантовым коммуникациям с интерферометром Маха-Цендера [12], обсуждается приобретение готового учебно-лабораторного комплекса квантового распределения ключей.

В целях обеспечения новой образовательной программы учебно-методическими материалами сотрудниками кафедры ОКСС в период 2021-2025 гг. издано 14 учебных и учебно-методических пособий, в том числе три пособия по дисциплинам, имеющим отношение к квантовым технологиям. Издательство «Техносфера» анонсировало выход нового учебника по квантовым технологиям (автор Былина М. С., ожидается публикация в 2026 году).

Развитие квантовых технологий в СПбГУТ осуществляется при непосредственной поддержке партнеров. Ключевыми компаниями РФ, реализующими оптические и квантовые коммуникации, активно внедряющими защищенные сети и магистральные квантовые каналы, являются Департамент квантовых коммуникаций (ЦКК) ОАО «РЖД», Российский квантовый центр (РКЦ), ООО «СМАРТС-Кванттелеком», ОАО «ИнфоТеКС», Госкорпорация «Росатом», ООО «QRATE», ООО «Т8», ПАО «Газпром», Госкорпорация «Ростех», ПАО «Сбербанк», ООО «Специальные системы. Фотоника», ОАО «Оптиковолоконные системы».

С учетом вышеизложенного, а также базируясь на аналитическом отчете Межведомственного Аналитического Центра (ОАО «МАЦ»), показывающего потребность в специалистах по квантовым коммуникациям к 2030 году – 8300 человек, из них 1300 – специалисты с высшим образованием [13], новая образовательная программа подготовки магистров «Оптические и квантовые технологии в инфокоммуникациях» является востребованной и актуальной, имеет понятных заказчиков и потенциальные места работы выпускников.

Список используемых источников

1. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии». М., 2019. URL: https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf (дата обращения: 28.02.2026).

2. Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства» // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: официальный сайт. М., 2025. URL: https://digital.gov.ru/target/naczionalnyj-proekt-ekonomika-dannyh-i-czifrovaya-transformacziya-gosudarstva (дата обращения: 28.02.2026).

3. Об утверждении Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 2030 годы): распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 № 3684-р: ред. от 25.12.2025 // Правительство России: официальный сайт. М., 2025. URL: http://static.government.ru/media/files/skzO0DEvyFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf (дата обращения: 28.02.2026).

4. О Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 24.11.2023 № 3339-р // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: официальный сайт. М., 2023.

5. О Концепции регулирования отрасли квантовых коммуникаций до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 11.07.2023 № 1856-р // Официальный интернет-портал правовой информации. М., 2023. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202307170029 (дата обращения: 28.02.2026).

6. Размер рынка квантовой связи, доля и прогноз до 2035 года // Research Nester. Нью-Йорк, 2025. URL: https://www.researchnester.com/ru/reports/quantum-communication-market/5747 (дата обращения: 28.02.2026).

7. Перечень поручений по итогам встречи со студентами вузов: утв. Президентом РФ 06.04.2023 № Пр-683. М., 2023. URL: http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/70886 (дата обращения: 28.02.2026).

8. Y Series: Global information infrastructure, Internet protocol aspects, next-generation networks, Internet of Things and smart cities // ITU-T. Женева, 2026. URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en (дата обращения: 28.02.2026).

9. Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования магистратура по направлению подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи: приказ Минобрнауки России от 22.09.2017 № 958 // Федеральные государственные образовательные стандарты. М., 2017. URL: https://fgos.ru/fgos/fgos-11-04-02-infokommunikacionnye-tehnologii-i-sistemy-svyazi-958/ (дата обращения: 28.02.2026).

10. Инженер-проектировщик в области связи (телекоммуникаций): профессиональный стандарт: утв. приказом Минтруда России от 16.11.2020 № 785н. М., 2020. URL: https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=67713 (дата обращения: 28.02.2026).

11. Инженер-проектировщик в области связи (телекоммуникаций): профессиональный стандарт: утв. приказом Минтруда России от 25.04.2023 № 327н. М., 2020. URL: https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=121589 (дата обращения: 28.02.2026).

12. Бразовский Г. Р. Виртуальная лаборатория по основам квантовой механики в СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича / Г. Р. Бразовский, А. В. Бурдин, М. С. Былина // Оптические технологии в телекоммуникациях (ОТТ-2024): материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф., г. Самара, 6–8 нояб. 2024 г. Самара: ПГУТИ, 2024. С. 188–189.

13. Отрасли квантовых коммуникаций потребуется более 8000 специалистов к 2030 году // ProQuantum: отраслевой портал. М., 2024. URL: https://proquant.ru/news/otrasli-kvantovykh-kommunikatsiy-potrebuetsya-bolee-8000-spetsialistov-k-2030-godu (дата обращения: 28.02.2026).

NEW MASTER'S DEGREE PROGRAM «OPTICAL AND QUANTUM TECHNOLOGIES IN INFORMATION COMMUNICATIONS»

Bylina M., Brazovskii G., Glagolev S., Polyakova E.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

New educational program «Optical and quantum technologies in Infocommunications» has been developed at St. Petersburg State University for the training of qualified masters in the field of Infocommunication Technologies and Communication Systems, who have a broad outlook, are ready to solve professional and practice-oriented tasks in the field of information and telecommunication systems of a new generation, possess the skills and competencies necessary for the development of innovative equipment and machinery complexes for optical and quantum communication systems, as well as for conducting scientific research in these areas. The developed program is consistent with the current challenges of the Russian economy, has a flexible curriculum, and has received the support of major employers.

Key words: quantum technologies, optical technologies, educational program, professional standard

УДК 681.785.574
ГРНТИ 29.31.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

М. С. Былина, А. В. Фраз

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлены результаты моделирования статического Фурье-спектрометра, в котором разность хода лучей создается диспергирующим элементом. Рассмотрена модификация конструкции спектрометра, предназначенная для анализа излучения видимого диапазона. Показано, что в диапазоне 560-800 нм спектрометр обеспечивает разрешение 1.4 нм. Даны рекомендации по модификации конструкции диспергирующего элемента для анализа излучения телекоммуникационного диапазона.

Фурье-спектрометр, статический Фурье-спектрометр, интерферограмма, восстановление спектра, диспергирующий элемент, пространственная разность хода лучей

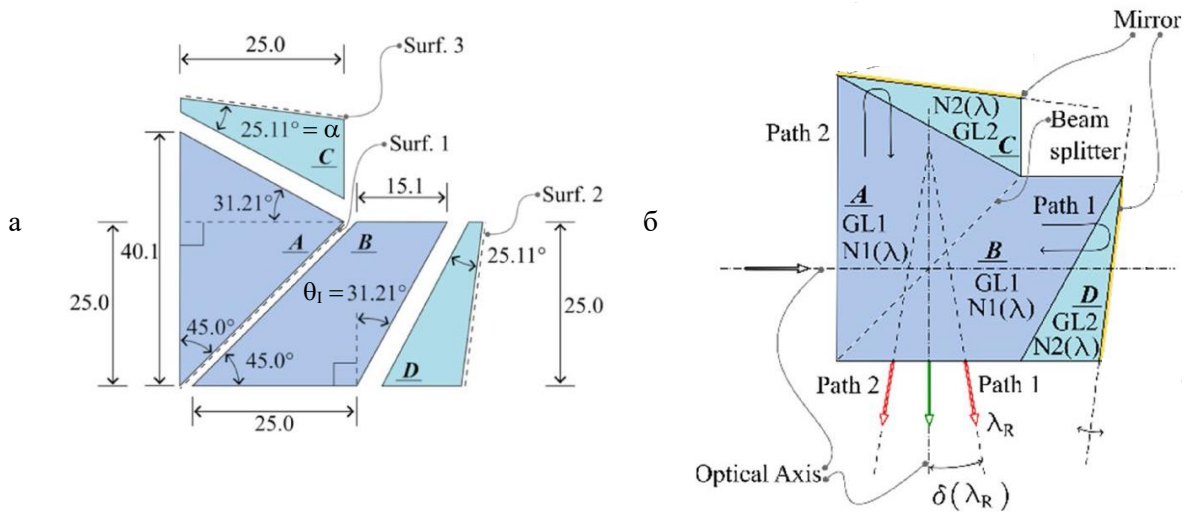
1. Введение

Фурье-спектрометр измеряет спектр оптического излучения в два этапа. Сначала происходит регистрация интерферограммы излучения, а затем осуществляется расчет спектра с помощью обратного Фурье-преобразования. Такие спектрометры имеют более высокое разрешение по сравнению со традиционными спектрометрами на основе диспергирующего элемента (дифракционной решетки или призмы).

Классический Фурье-спектрометр строится на основе двухлучевого интерферометра Майкельсона, одно из зеркал которого делается подвижным для создания линейного изменения разности хода между лучами. В [1] предложена конструкция статического Фурье-спектрометра, не содержащего подвижных элементов, в котором необходимая разность хода лучей получается с помощью диспергирующего элемента, состоящего из четырех склеенных призм (рис. 1а). Поверхность Surf.1 между призмами A и B формирует светоделитель. На поверхности Surf.2 и Surf.3 нанесены высокоотражающие покрытия. Излучение, падающее на левую грань призмы A, разделяется светоделителем Surf.1. Отраженный свет направляется в призму C и отражается от Surf.2, а прошедший – в призму D и отражается от Surf.3.

Отраженные от Surf.2 и Surf.3 излучения объединяются светоделителем Surf.1 и через нижнюю грань призмы B попадают на фотоприемную матрицу. Призмы C и D одинаковые, разность хода между отраженным и прошедшим лучами достигается за счет их разной ориентации.

В работе моделируется работа данного спектрометра для анализа излучения видимого диапазона и даны рекомендации по модификации конструкции для телекоммуникационного (ближнего инфракрасного) диапазона. Параметры модели приведены в табл. 1.



а б

Рис. 1. Диспергирующий элемент (а) и формирование двух лучей (б) в статическом Фурье-спектрометре

Спектральные характеристики прибора определяются максимальной достижимой разностью хода, параметрами дисперсионного элемента и дискретизацией интерференционной картины фотоприемной матрицей [1-3].

ТАБЛИЦА 1. Параметры моделируемого спектрометра

Параметр	Значение
Материал призм A и B GL1	BK7
Материал призм C и D GL2	SF57
Рабочий диапазон, нм	560 – 800
Угол θ_I, град.	31.21°
Угол α, град.	25.11°

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты уравнения Селлмейера для материалов призм [4]

	k	B_k	C_k, мкм
BK7	1	1.039612120	0.00600069867
	2	0.231792344	0.0200179144
	3	1.010469450	103.56065300
SF57	1	1.875438310	0.014174952
	2	0.373757490	0.0640509927

	3	2.300017970	177.3897950

2. Математическая модель

На рис. 1б поясняется процесс формирования двух лучей (Path1 и Path2), образующих интерференционную картину. Угол δ зависит от длины волны регистрируемого излучения λ, показателей преломления (ПП) призм и углов θ_I и α и определяется выражениями [1]:

$$\delta(\lambda) = arcsin\left(N_1(\lambda) \cdot sin\left(\gamma(\lambda)\right)\right), \quad (1)$$

$$\gamma(\lambda) = \theta_I - \arcsin\left(\frac{N_2(\lambda)}{N_1(\lambda)} sin\left(2\alpha - arcsin\left(\frac{N_1(\lambda)}{N_2(\lambda)} sin(\theta_I)\right)\right)\right) \quad (2)$$

Зависимости ПП призм $N_1(\lambda)$ и $N_2(\lambda)$ рассчитываются с использованием уравнения Селлмейера [4]:

$$N(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{N} \frac{B_k \lambda^2}{\lambda^2 - C_k}}, \quad (3)$$

где λ – длина волны, N – число резонансов, B_k – амплитуда k-ого резонанса на длине волны C_k (табл. 2).

Пространственная разность хода между лучами Path1 и Path2 может быть рассчитана по выражению [1]:

$$p(\lambda) = \frac{\lambda}{2|sin(\delta(\lambda))|}. \quad (4)$$

В Фурье-спектрометрии вместо длин волн λ используют волновые числа ν = 1 / λ. Дискретизируем рабочий диапазон волновых чисел с шагом Δν

$$\nu_m = \nu_{min} + m \cdot \Delta\nu, \quad (5)$$

где m = 0, 1, 2,…M – 1.

Определим шаг для дискретизации разности хода лучей $\Delta p = p_{\max} / N_{pix}$, $p_{\max}$ – максимальная разность хода, которая может быть достигнута. Тогда для отсчетов разности хода можно записать:

$$p_n = n \cdot \Delta p, \quad (6)$$

где n = 0, 1, 2,…N_{pix} – 1. Величина Δp должна удовлетворять критерию Найквиста, который имеет вид:

$$\Delta p \leq 1/(2 \cdot \nu_{max}), \quad (7)$$

где ν_{max} – верхний предел рабочего диапазона волновых чисел.

На фотоприемной матрице формируется интерферограмма, которая в дискретной форме имеет вид [2]:

$$I(p_n) = \Delta\nu \cdot \sum_{m=0}^{M-1} S(\nu_m) \cdot \cos(2\pi\nu_m p_n). \quad (8)$$

где $S(\nu)$ – измеряемый спектр излучения.

Восстановление спектра излучения $S_{rec}(\nu)$ по интерферограмме производится по выражению:

$$S_{rec}(\nu_m) = 2\Delta p \sum_{n=0}^{N_{pix}-1} I(p_n) \cos(2\pi\nu_m p_n). \quad (9)$$

Для улучшения качества восстановления спектра можно предварительно выполнить удаление из интерферограммы постоянной составляющей (вычитание среднего $\bar{I}$) [2] и аподизацию ее окном Хэннинга $w(p)$ [3]:

$$I_w(p) = (I(p) - \bar{I})w(p),\ w(p) = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi p}{N_{pix}-1}\right)\right). \quad (10)$$

Обработанную интерферограмму $I_w(p)$ используют в (9) вместо $I(p)$. При использовании такой обработки для сопоставления исходного и измеренного спектров их следует нормировать по энергии [2].

3. Результаты моделирования

На рис. 2 представлен график $p(\lambda)$ в рабочем диапазоне длин волн. Из рисунка видно, что максимальная разность хода, которая может быть достигнута, составляет $p_{\max} \approx 170$ мкм.

В нашем случае $\nu_{max} \approx 1.8$ мкм$^{-1}$, что соответствует $\Delta p \leq 0.28$ мкм, то есть следует выбирать $N_{pix} \geq p_{max}/\Delta p \approx 606$. Примем для дальнейших расчетов $N_{pix} = M = 1000$.

Регистрируемый спектр излучения представлен на рис. 3. На рис. 4 представлена его интерферограмма, рассчитанная по выражению (8).

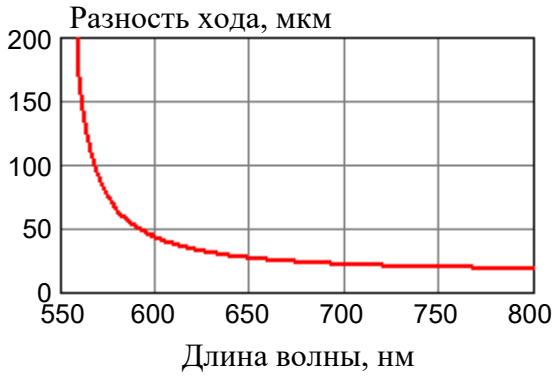


Рис. 2. Зависимость $p(\lambda)$ в рабочем диапазоне длин волн

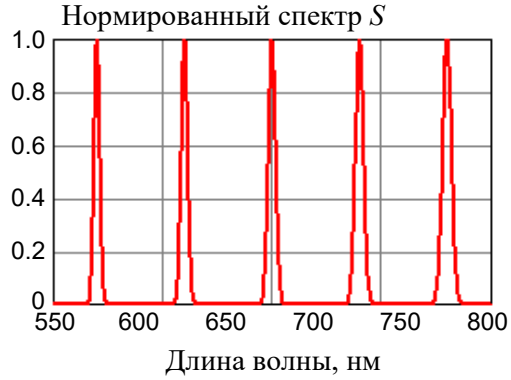


Рис. 3. Нормированный спектр регистрируемого излучения

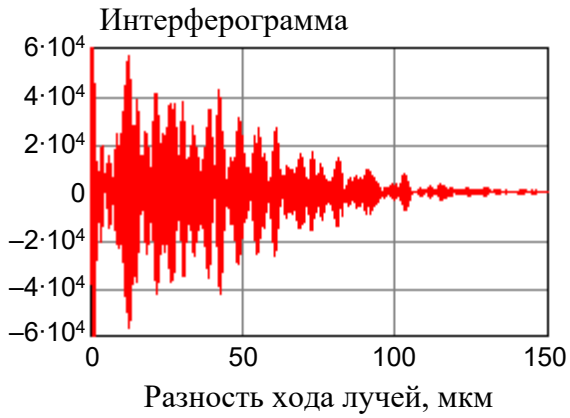


Рис. 4. Интерферограмма регистрируемого излучения

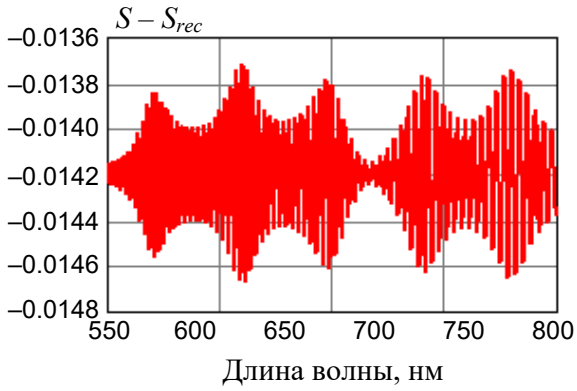


Рис. 5. Разность между регистрируемым и восстановленным спектром

Восстановленный спектр, рассчитанный по выражению (10), практически совпал со спектром регистрируемого излучения. Из рис. 5 видно, что погрешность восстановления не превышает 1.5 %.

Полученное разрешение спектрометра δλ можно оценить по выражению:

$$\delta\lambda \approx \frac{\lambda_c^2}{2p_{max}}, \qquad (11)$$

где λ_c – центральная длина волны рабочего диапазона. При выбранных параметрах получаем δλ ≈ 1.4 нм.

4. Заключение

Результаты моделирования показали, что статический Фурье-спектрометр с дисперсионным элементом из кварцевых стекол BK7 и SF57 позволяет анализировать спектр видимого излучения. Его разрешение в диапазоне 560-800 нм составляет 1.4 нм.

Представляет интерес создание статического Фурье-спектрометра для более длинноволнового телекоммуникационного диапазона. Однако проведенные расчеты показали, что выбранные материалы дисперсионного элемента обеспечивают в этом диапазоне разность хода лучей не более 18.5 мкм, что соответствует очень грубому разрешению δλ ≈ 46 нм. Для улучшения характеристик необходимо использовать призмы с большей материальной дисперсией в телекоммуникационном диапазоне и увеличивать габариты устройства.

Список используемых источников

1. Frassetto F., Cocola L., Zuppella P., Da Deppo V., Poletto L. Static, refractive and monolithic Fourier transform spectrometer: development and prototyping // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 1164. DOI: 10.1038/s41598-023-51008-0.
2. Davis S. P., Abrams M. C., Brault J. W. Fourier Transform Spectrometry. San Diego: Academic Press, 2001. XXIII, 438 p. ISBN 978-0-12-042510-5.
3. Griffiths P. R., De Haseth J. A. Fourier Transform Infrared Spectrometry. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. XVII, 560 p. ISBN 978-0-471-19404-0.
4. SCHOTT. Optical Glass Datasheets: N-BK7, N-SF57.

MODELING AND RESEARCH OF A STATIC FOURIER SPECTROMETER

Bylina M., Fraz A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article presents the results of modeling a static Fourier spectrometer in which the beam path difference is created by a dispersive element. A modification of the spectrometer design intended for the analysis of visible radiation is considered. It is shown that in the 560-800 nm range, the spectrometer provides a resolution of 1.4 nm. Recommendations for modifying the dispersive element design for the analysis of telecommunications radiation are provided.

Key words: fourier spectrometer, static Fourier spectrometer, interferogram, spectrum reconstruction, dispersive element, spatial beam path difference

УДК 621.391.31
ГРНТИ 45.31.01

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАТРИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ УСТАНОВКАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

П. Ю. Виноградов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В электропитающих установках телекоммуникационных устройств аккумуляторные батареи обеспечивают выполнение бесперебойности электропитания и, тем самым, бесперебойности связи. В наиболее тяжелых климатических условиях находится оборудование, расположенное вне помещений оператора связи (outdoor), это базовые станции сотовой связи, радиорелейные линии, значительная часть оборудования компании «Транстелеком» и др. Важным является минимальная зависимость характеристик аккумулятора от широкого диапазона наружной температуры. Решить проблему применением системы кондиционирования, как это делается в помещениях, для уличных систем дорого и не надежно. Перспективным решением может стать применение натрий-ионных аккумуляторных батарей, получающих все более широкое распространение. По своим характеристикам, кроме плотности запасенной энергии, они существенно превосходят литиевые аналоги. Однако требуют модернизации схемотехнических решений для выпрямительных модулей и контроллеров.

электропитающая установка, аккумуляторная батарея, температурная зависимость, плотность энергии

В настоящее время в электропитающих установках (ЭПУ) телекоммуникационного оборудования широко применяются аккумуляторные батареи (АБ) на основе лития в качестве агрегатов бесперебойного питания. Эти АБ имеют лучшие показатели по плотности энергии и минимальное уменьшение срока службы при высоких температурах, что особенно важно для уличных объектов, а это большинство базовых станций сотовой связи, узлы радиорелейной связи, объекты АО «Компания ТрансТелеКом». Однако литиевые АБ не лишены недостатков. Они, за исключением, литий-железофосфатных батарей не работают при отрицательных температурах и требуют систем мониторинга (BMS – battery management system) не допускающих глубокого разряда и перезаряда батарей. Таким образом литиевая АБ, будучи внешне безобрывно подключенной к выходным шинам ЭПУ, фак-

тически является отключенной электронными ключами встроенной BMS. Быстродействие BMS определяет бесперебойность питания.

Кроме лития, в группу щелочных металлов входят натрий и калий. Они также могут легко отдавать один электрон, образуя положительные ионы. На этой основе могут быть построены металл-ионные АБ. Такие разработки ведутся, в основном на основе натрия. Фундаментальная проблема в том, что ионы натрия имеют большую массу и размер, чем ионы лития. Поэтому невозможно достичь высоких показателей по удельной плотности энергии. Натрий-ионные АБ уступают литиевым примерно в полтора-два раза, превосходя свинцово-кислотные в четыре раза. Работы по повышению плотности энергии всех металл-ионных АБ ведутся. Опытные образцы имеют этот показатель в разы больше, чем серийные. Электрохимические реакции и конструкции литиевых и натриевых АБ похожи, что ускоряет разработку и внедрение последних. Натрий в 1000 раз более распространен, чем литий и 50 раз дешевле. Его производство экологически чище. Пока натрий-ионные аккумуляторы сопоставимы по цене с литиевыми. Это связано с продолжающимися исследованиями, что сдерживает широкое внедрение в производство. В перспективе натриевые будут существенно дешевле. На сегодня натрий-ионные АБ уже обладают заметными преимуществами [1].

Одно из важнейших качеств – высокая безопасность, значительно меньший риск теплового разгона и, следовательно, высокая пожаробезопасность. Также натриевые АБ не боятся глубокого разряда (литиевые при этом могут потерять способность к восстановительному заряду) и перезаряда, грозящего у литиевых АБ возгоранием. Следовательно, системы мониторинга батарей (BMS) могут быть проще, а вся АБ надежнее.

Натриевые АБ сохраняют нормальную работоспособность в широком диапазоне температур. По некоторым данным – от – 40°С до + 60°С. При температуре – 20°С они сохраняют до 90 % своей емкости, тогда как свинцово-кислотные теряют 60 %, а большинство литиевых вообще не работает, исключая литий-железо-фосфатные, но с заметной потерей емкости. Способность работать в широком диапазоне температур, как отмечалось выше, важна для систем уличного расположения (outdoor), где кондиционирование почти не применяется в силу большой стоимости и невысокой надежности.

Другое преимущество – высокий ток заряда и, соответственно, малое время заряда. Хотя последнее важно для электротранспорта и не так существенно для телекоммуникаций.

Перечисленные выше преимущества делает применение натрий-ионных батарей весьма перспективными в развивающейся технологии 5G, где потребуется значительно более высокая плотность базовых станций небольшой мощности, но очень высокой надежности с минимальным обслуживанием. Желательно по технологии «Подключил и забыл».

Здесь есть технологическое препятствие. Все современные ЭПУ строятся с буферным подключением АБ на выходе. Это обеспечивает бесперебойность электропитания телекоммуникационного оборудования при любых перебоях до АБ. Но диапазон напряжения на АБ в любых режимах должен составлять примерно +/- 20 %. От среднего значения. На этом основаны международные стандарты и российских ГОСТы [2]. Диапазон напряжений при буферном подключении натрий-ионной АБ, т. е. разница между минимальным напряжением разряда и максимальным напряжением заряда на один элемент не менее двукратного от 2В (при глубоком разряде от 1,5В) до 4В при среднем напряжении разряда порядка 3В. Значит, без дополнительных схемотехнических решений не обойтись.

При переходе на стандарт питания 48В в начале 90-х годов XX века за основу был взят разрядно-зарядный диапазон свинцово-кислотных аккумуляторов. Условная цифра 48 В – это 24 двух вольтовых элемента, включенных последовательно. Нижняя стандартизованная граница буферного напряжения – 40,5 В определяется минимальным напряжением разряда одного элемента – 1,75 В, а верхняя – 57 В максимальным напряжением заряда на один элемент – 2,4 В.

Затем появились литиевые и солевые АБ [2]. У них напряжение одного элемента выше 2В, следовательно, число последовательно включенных элементов меньше. При этом суммарное напряжение укладывается в стандартный диапазон. Поэтому при переходе от одного типа АБ к другому можно использовать те же выпрямительные модули и контроллер ЭПУ. Требуется только перепрограммирование контроллера.

Сейчас появились первые упоминания об ЭПУ телекоммуникационных объектов, использующих натрий-ионные аккумуляторы в качестве агрегатов бесперебойного питания. Там информация носит рекламный характер без технических деталей.

Более широко натрий-ионные АБ начали использовать для построения источников бесперебойного питания (ИБП) по переменному току. Рассмотрим ИБП с двойным преобразованием (on-line). При применении свинцово-кислотных или литиевых аккумуляторов ИБП строится следующим обра-

зом. На входе стоит выпрямитель, работающий на внутреннюю шину постоянного тока. К этой шине подключены резервная АБ и выходной инвертор, формирующий качественное одно- или трехфазное переменное напряжение. При пропадании напряжения на входе ИБП энергия в шину постоянного тока без перебоя поступает от АБ. При восстановлении электроснабжения входной выпрямитель обеспечивает питание инвертора и заряд АБ. Во всем разрядно-зарядном диапазоне напряжений АБ выходной инвертор дает качественное синусоидальное напряжение по форме и величине за счет управляющего ШИМ контроллера. С натрий-ионными АБ такая схема не работает, т.к. диапазон напряжений на шине постоянного тока будет значительно шире. Приведу цитату из [3]: «Натриевые аккумуляторы, в отличие от литиевых аккумуляторов, нельзя было просто использовать в тех же системах, где раньше были установлены свинцово-кислотные из-за существенно более широкого диапазона напряжений работы. Этот важный и в целом положительный аспект работы с Na+ накладывал требования по серьезной переработке зарядных устройств ИБП и логики работы встроенного инвертора ИБП».

В ИБП появились дополнительные зарядные выпрямители, что увеличило массу, габариты и стоимость, уменьшило надежность выпрямительной части. Эти недостатки компенсированы преимуществом натриевых АБ.

Такой же подход должен быть при разработке ЭПУ стандарта 48 В. Помимо дополнительных зарядных выпрямителей возможно понадобятся регулируемые вольтодобавочные устройства, которые широко применялись при шестидесяти вольтовом стандарте питания для стабилизации выходного напряжения ЭПУ.

Указанные схемотехнические усложнения наверняка будут преодолены и натрий-ионные аккумуляторы уверено войдут в системы электропитания.

Список используемых источников

1. Сидоров А. Натрий-ионные аккумуляторы от А до Я // Radioskot.ru. 2023. URL: https://radioskot.ru/publ/zu/natrij-ionnye-akkumulyatory-ot-a-do-ya (дата обращения: 26.12.2025).

2. Виноградов П. Ю. Применение не кислотных аккумуляторных батарей в электропитающих установках базовых станций сотовой связи. //Сборник научных статей НТК ППС 2025г, СПб.: СПбГУТ, 2025. Т. 1. С. 69-73.

3. Натриевые аккумуляторы в ИБП. Тихая революция, как натриевые ИБП изменили рынки ИБП. 30.06 2025. https://dzen.ru/a/aDmRmL3m_E7CAxrD (дата обращения: 26.12.2025).

ABOUT THE POSSIBILITY OF USING SODIUM-ION BATTERIES IN POWER SUPPLY OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT

Vinogradov P.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In power supply of telecommunication devices, batteries ensure uninterrupted power and, thereby, uninterrupted communication. In the most severe climatic conditions, there is equipment located outside the premises of the telecom operator (outdoor), these are cellular base stations, radio relay lines, a significant part of Transtelecom's equipment, etc. It is important to minimize the dependence of battery characteristics on a wide range of outdoor temperatures. Solving the problem by using an air conditioning system, as it is done indoors, is expensive and not reliable for outdoor systems. A promising solution may be the use of sodium-ion batteries, which are becoming more widespread. In terms of their characteristics, except the density of stored energy, they are significantly superior to lithium analogues. However, they require modernization of circuit design solutions for rectifier modules and controllers.

Key words: power supply, battery, temperature dependence, energy density

УДК 621.311.24
ГРНТИ 49.33.29

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ 5G В СРЕДЕ MATHWORKS SIMSCAPE

П. Ю. Виноградов, Р. А. Михайлов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлены результаты практической реализации имитационной модели гибридной системы электропитания (СЭП) для объектов связи стандарта 5G. В основу исследования положен двухэтапный подход, включающий предварительную математическую оптимизацию состава оборудования и последующую верификацию в среде MathWorks Simscape. Разработана комплексная модель «цифрового двойника», включающая подсистемы солнечной и ветровой генерации, активную нагрузку и систему накопления энергии. Ключевой особенностью работы является применение библиотеки Simscape Battery для детального моделирования электрохимических и тепловых процессов в аккумуляторной сборке LiFePO4. В ходе исследования проведена симуляция суточных циклов работы базовой станции, проанализированы динамические характеристики переходных процессов в шине постоянного тока и верифицирована работоспособность системы терморегулирования в условиях экстремальных токов заряда.

сети 5G, системы электропитания, гибридные энергосистемы, имитационное моделирование, цифровой двойник, MathWorks Simscape, Simscape Battery, аккумуляторные батареи, терморегулирование, оптимизация

Внедрение сетей пятого поколения (5G) и технологий Massive MIMO ведет к кратному увеличению плотности мощности телекоммуникационного оборудования. В отличие от базовых станций LTE со средним потреблением 2–3 кВт, пиковая мощность макро-станций 5G достигает 10–12 кВт [1-5]. Профиль нагрузки приобретает ярко выраженный динамический характер, что в условиях автономного энергоснабжения создает риски глубоких просадок напряжения и перегрева накопителей энергии.

Традиционные расчетно-аналитические методы (статический баланс мощностей) не позволяют анализировать переходные процессы и тепловые режимы аккумуляторных батарей (АКБ) [2]. Это формирует необходимость перехода к имитационному моделированию.

Целью работы является разработка и исследование модели («цифрового двойника») гибридной системы электропитания (ГСЭП) в среде

MathWorks Simscape для анализа динамической устойчивости и тепловых режимов.

В работе реализован двухэтапный подход к проектированию. На первом этапе с помощью разработанного автором программного обеспечения на языке Python производился расчет оптимального состава оборудования для обеспечения 100 % автономности объекта (рис. 1).

В качестве исходных данных принят суточный профиль потребления базовой станции 5G (**156 кВт·ч**) и климатические параметры Ставропольского края. По результатам итерационного поиска для осеннего периода была определена следующая конфигурация:

Фотоэлектрический массив: 60 панелей (суммарная мощность 35,4 кВт).

Ветроэнергетические установки (ВЭУ): 8 единиц (суммарная мощность 24 кВт).

Как видно из гистограммы (рис. 1), данная комбинация обеспечивает положительный энергобаланс даже в дефицитные месяцы (ноябрь), что стало основанием для использования этих параметров в динамической модели.

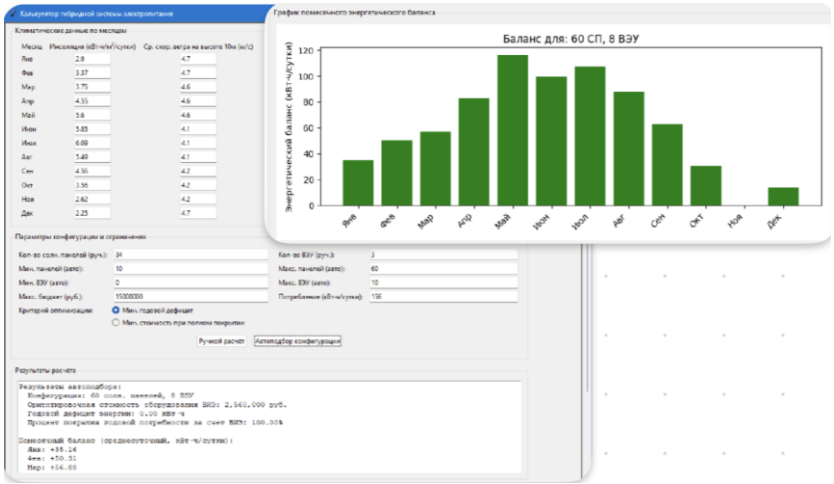


Рис. 1. Результаты расчета оптимальной конфигурации в авторском ПО

На втором этапе была разработана топологическая модель системы (рис. 2), использующая библиотеки Simscape Electrical и Simscape Battery.

Основу генераторной подсистемы составляют управляемые источники тока, имитирующие работу ВИЭ с учетом стохастического характера погоды. Нагрузка 5G также реализована динамически, имитируя резкие скачки трафика. Центральным элементом является модель аккумуляторного блока LiFePO4, построенная на базе эквивалентных схем. В модели активирован

тепловой порт (Thermal Port), позволяющий рассчитывать джоулевы потери и температуру ячеек в реальном времени.

Для предотвращения перегрева в структуру введена подсистема активного терморегулирования, реализованная через блок конвективного теплообмена (Convective Heat Transfer), имитирующий работу климатической установки.

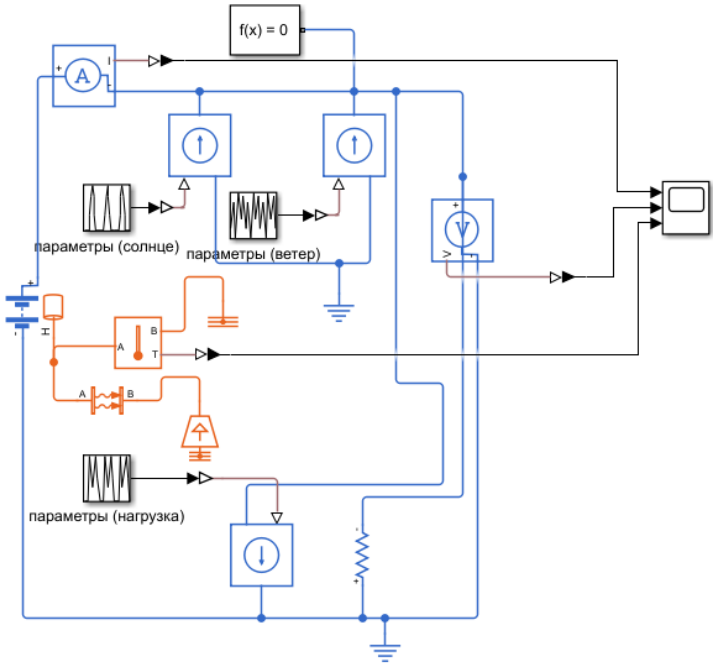


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели «цифрового двойника»

Для верификации системы выбран сценарий полного суточного цикла (**86 400 с**) в условиях осеннего периода (световой день 10 часов). Параметры модели:

– нагрузка: базовое потребление – 4 квт (83,3 а), пиковое – 10 квт (208,3 а);
– генерация: пиковый ток солнечного массива – 737,5 а, суммарный ток вэу – до 500 а;
– накопитель: емкость 4000 а·ч (192 кВт·ч), напряжение 48 в; начальный заряд (soc) – 50 %;
– терморегулирование: коэффициент теплоотдачи 100 Вт/(м²·к), площадь охлаждения 20 м².

Использование решателя *ode15s* обеспечило устойчивость расчета при высоких токах.

Результаты моделирования суточного цикла представлены на рис. 3.



Рис. 3. Финальные суточные графики

Динамика токов. Верхний график демонстрирует, что в дневные часы (30–60 тыс. сек) суммарный ток заряда достигает **1000 А** за счет наложения пиков солнечной и ветровой генерации. Это подтверждает способность выбранной конфигурации быстро восстанавливать заряд АКБ.

Стабильность напряжения. Средний график показывает, что напряжение на шине варьируется в диапазоне 49–58 В. Отсутствие просадок ниже 44 В при пиковых нагрузках (10 кВт) доказывает высокую жесткость внешней характеристики системы.

Тепловой режим. Нижний график иллюстрирует работу системы охлаждения. Несмотря на экстремальные токи заряда, температура АКБ выросла с 298 К (25 °С) лишь до **303,5 К (30,3 °С)**. Предварительное моделирование без блока терморегулирования показывало критический перегрев. Таким образом, модель подтвердила эффективность спроектированной системы охлаждения.

В работе реализован комплексный подход к проектированию СЭП для сетей 5G. Сочетание математической оптимизации и имитационного моделирования позволило обосновать конфигурацию оборудования (60 СП, 8 ВЭУ) и доказать ее физическую состоятельность. Использование инструментов Simscape позволило выявить и купировать риски перегрева накопителей, что невозможно сделать в рамках традиционных статических расчетов. Разработанная модель готова для дальнейшего использования при оптимизации алгоритмов управления (EMS).

Список используемых источников

1. Alsharif M. H. et al. Powering Mobile Networks with Optimal Green Energy for Sustainable Development //Computers, Materials & Continua. 2021. Т. 69. № 1.
2. Woon L. J., Ramasamy G., Thiagarajah S. P. Peak power shaving in hybrid power supplied 5G base station //Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2021. Т. 10. № 1. С. 62-69.
3. Михайлов Р. А. Разработка и исследование системы электропитания на альтернативных источниках для объекта радиосвязи //магистерская диссертация. СПбГУТ. Санкт-Петербург. 2025.
4. Документация к Simscape Electrical URL: https://www.mathworks.com/help/releases/R2025a/sps/index.html?s_tid=hc_product_card (дата обращения: 11.02.2026).
5. Документация к Simscape Battery. URL: https://www.mathworks.com /help/releases/R2025a/simscape-battery/index.html?s_tid=hc_product_card (дата обращения: 11.02.2026).

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SIMULATION MODEL OF A HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM FOR A 5G BASE STATION IN THE MATHWORKS SIMSCAPE ENVIRONMENT

Vinogradov P., Mikhailov R.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper presents the results of the practical implementation of a simulation model of a hybrid power supply system (HPSS) for 5G standard communication facilities. The research is based on a two-stage approach, including preliminary mathematical optimization of equipment composition and subsequent verification in the MathWorks Simscape environment. A complex «digital twin» model has been developed, including subsystems for solar and wind generation, active load, and an energy storage system. A key feature of the work is the application of the Simscape Battery library for detailed modeling of electrochemical and thermal processes in a LiFePO4 battery assembly. During the study, a simulation of the daily operation cycles of the base station was carried out, the dynamic characteristics of transients in the DC bus were analyzed, and the operability of the thermal regulation system under extreme charging currents was verified.

Key words: 5G networks, power supply systems, hybrid energy systems, simulation modeling, digital twin, MathWorks Simscape, Simscape Battery, rechargeable batteries, thermal regulation, optimization

УДК 004.94, 519.72
ГРНТИ 49.03.05

ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ СЕТЕВОГО КОДИРОВАНИЯ В СРЕДУ МОДЕЛИРОВАНИЯ NS3

С. С. Владимиров, К. Т. Хоанг

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Сетевое кодирование представляет собой метод обработки пакетов, позволяющий повысить эффективность передачи данных за счет линейной комбинации пакетов в промежуточных узлах. В сценариях современных сетей связи, характеризующихся масштабной структурой, перед практическим применением новых подходов необходимым условием для оптимизации ресурсов является проведение имитационного моделирования. В данной работе представлен подход к интеграции сетевого кодирования в среду моделирования ns-3 на основе сторонних библиотек.

сетевое кодирование, перекодирование пакетов, библиотека Kodo, имитационное моделирование, ns-3

Сетевое кодирование (СК, Network Coding, NC) – это метод, при котором промежуточные узлы сети выполняют не только функцию ретрансляции пакетов, но и обладают способностью кодировать входящие пакеты данных перед их отправкой [1]. Применение СК позволяет достичь скорости передачи, соответствующей пределу теоремы о максимальном потоке и минимальном разрезе [2]. В настоящее время наиболее распространенной формой сетевого кодирования является случайное линейное СК, имеющее наилучшую практическую применимость [3]. Алгоритмы кодирования и декодирования, основанные на линейной алгебре, в частности на полях Галуа, позволяют оптимизировать вычислительную эффективность и использование памяти. Это создает основу для реализации методов СК в средах имитационного моделирования, таких как ns-3, с целью оценки производительности сети в различных сценариях. Исследование применения СК в системе ns-3 базируется на интеграции специализированных библиотек в среду моделирования. Ниже представлены основные принципы интеграции специализированной библиотеки Kodo в ns-3.

Kodo – это библиотека на языке C++11, реализующая различные методы СК, включая случайное линейное СК, опорное СК (метод Fulcrum) и непрерывное сетевое кодирование (Perpetual Network Coding) [3].

Метод опорного СК Fulcrum представляет собой структуру многоуровневого СК (внутреннее и внешнее кодирование), разработанную для обеспечения адаптивности между устройствами с различными вычислительными мощностями в сетевой системе [4].

Непрерывное сетевое кодирование – это форма кодирования со скользящим окном, целью которой является снижение вычислительной сложности [5].

Интерфейс прикладного программирования Kodo через привязки (bindings) C++ позволяет интегрировать ее в среду моделирования ns-3 с использованием вспомогательных классов топологии. Kodo ориентирована на внутрисессионное сетевое кодирование, то есть выполнение кодирования между пакетами в пределах одного потока данных. Исходные данные разделяются на поколения, состоящие из g пакетов, обозначаемых P_1, P_2, …, P_g. Каждый закодированный пакет C_i формируется путем линейной комбинации исходных пакетов с использованием случайных коэффициентов $v_{i,j}$, выбираемых из поля Галуа GF(q):

$$C_i = \sum_{j=1}^{g} \left(v_{i,j} \otimes P_j\right) mod 2,$$

где $i = 1..g$.

Для обеспечения возможности декодирования на принимающей стороне коэффициенты $v_{i,j}$ инкапсулируются в заголовок закодированного пакета. Размер данного заголовка определяется количеством пакетов в поколении g и размерностью поля q. Принимающая сторона должна собрать совокупность из g линейно независимых закодированных пакетов для восстановления исходных данных. Процесс восстановления реализуется с использованием алгоритма исключения Гаусса, который позволяет привести матрицу коэффициентов V к ступенчатому виду по строкам. Исходные пакеты P_j вычисляются решением системы уравнений $C = V \times P$ [3].

В многопрыжковых сетях (multi-hop) реализуется процесс перекодирования, который позволяет промежуточным узлам комбинировать закодированные пакеты без их предварительного декодирования. Перекодированный пакет R_i формируется путем комбинации существующих закодированных пакетов C_j с использованием новых коэффициентов $w_{i,j}$:

$$R_i = \sum_{j=1}^{g} \left(w_{i,j} \otimes C_j\right) mod 2,$$

где $i = 1..g$.

Процесс перекодирования обновляет степень линейной независимости пакетов, что повышает вероятность успешного декодирования на узле назначения без необходимости повторной передачи из источника. Однако между ns-3 и Kodo существуют значительные различия в объектно-ориентированной архитектуре и механизмах управления памятью, что препятствует их прямому взаимодействию.

В ns-3 используется объект Ptr<Packet>, который содержит не только данные, но и различные заголовки (IP, UDP, MAC), а также метки (Tags) системы моделирования. В то же время Kodo представляет собой математическую библиотеку на стандартном C++, которая обрабатывает данные исключительно в виде байтовых массивов uint8_t* или std::vector<uint8_t>. Вспомогательные классы топологии служат интерфейсом между исходным кодом Kodo и объектно-ориентированной структурой Ns-3. Процесс моделирования в Ns-3 при интеграции функционала сетевого кодирования библиотеки Kodo состоит из двух основных этапов: этапа настройки и цикла моделирования, показанных на рис. 1.

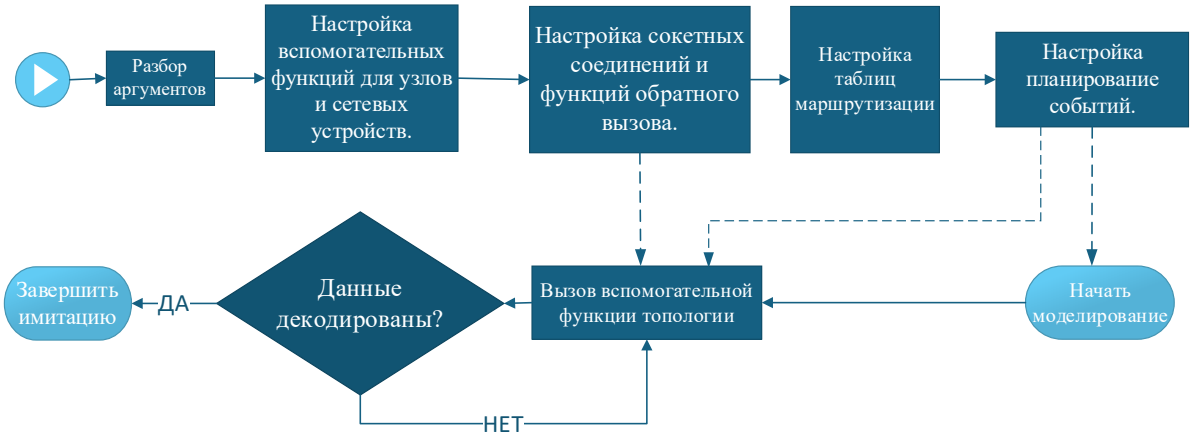


Рис. 1. Алгоритм функционирования модели сетевого кодирования

1. Этап настройки включает последовательность шагов по формированию логической сетевой инфраструктуры в симуляторе:

– разбор аргументов: программа принимает входные параметры из командной строки такие как вероятность ошибки в канале, размер поколения g, размер поля Галуа и так далее;
– настройка вспомогательных функций узлов и сетевых устройств: создание базовых сетевых сущностей и эмуляция аппаратных устройств;
– установка сокет-соединений и функций обратного вызова: определение портов UDP для транспортировки данных. Ключевым моментом является

настройка обратного вызова – механизма, позволяющего программе автоматически активировать декодер при поступлении пакета на сокет;
– настройка таблиц маршрутизации и планирование событий: определение маршрутов пакетов и инициализация временных событий, например, времени начала отправки первого пакета.

2. Цикл моделирования – это этап управления моделированием и взаимодействия с вспомогательными функциями топологии. Используются две основные вспомогательные модели. Для широковещательных топологий применяется модель Broadcast Topology Helper. В случае многопрыжковых структур применяется модель Recoders Topology Helper, которая выполняет функции управления промежуточными узлами, осуществляющими перекодирование данных. Пользователи могут расширять эти модели для реализации в других, более сложных сетевых сценариях на основе существующей программной платформы. Например: после настройки IP-адресов и устройств нам нужна одна командная строка: BroadcastTopologyHelper helper(encoder_factory, decoder_factory). При инициализации вспомогательной функции топологии и его привязке к списку узлов, он автоматически установит кодировщик и декодировщик на принимающих и передающих узлах. После выполнения команды «Начать моделирование» система переходит в состояние управления событиями:
– вызов помощника топологии: при возникновении события передачи или приема вызываются вспомогательные функции топологии. Он выступает в роли интерфейса, преобразующего данные из формата пакета Ns-3 в данные для обработки кодером или декодером библиотеки Kodo.
– проверка статуса декодирования: система непрерывно проверяет, собрано ли на стороне назначения достаточное количество линейно независимых пакетов для полного восстановления поколения данных.
– нет: цикл продолжается; вспомогательная функция топологии координирует передачу новых закодированных пакетов в соответствии с расписанием событий.
– да: условие завершения сценария выполнено, данные полностью восстановлены на узле назначения.

3. Завершение моделирования: когда все поколение данных успешно декодировано на всех целевых узлах или в соответствии с заданной политикой передачи, симулятор останавливается для извлечения статистических данных, таких как общее количество передач, пропускная способность и время освобождения ресурсов.

В данной статье представлен подход к имитационному моделированию методов СК в системе ns-3, позволяющий оценить влияние параметров кодирования (размер поколения, размер поля Галуа, коэффициент ошибок

в канале) на производительность сети (пропускная способность, задержка, количество повторных передач, коэффициент восстановления данных). Результаты, полученные с помощью данной модели, могут служить основой для сравнительного анализа традиционных методов маршрутизации и методов сетевого кодирования, а также для оценки эффективности алгоритмов случайного линейного СК, опорного СК (Fulcrum) и других методов СК при их реализации в ns-3. Представленный вариант интеграции методов СК из библиотеки Kodo в ns-3 предназначен для разработки и тестирования практических решений, направленных на повышение надежности и эффективности передачи данных в современных сетевых системах.

Список используемых источников

1. Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y. R., Yeung R. W. Network information flow // IEEE Transactions on Information Theory. 2000. Vol. 46, No. 4. P. 1204–1216.

2. Fragouli C., Soljanin E. Network coding fundamentals // Foundations and Trends in Networking. 2007. Vol. 2, No. 1. P. 1–133.

3. Pedersen M. V., Heide J., Fitzek F. H. P. Kodo: an open and research oriented network coding library // Proceedings of the IFIP TC 6th international conference on Networking (NETWORKING'11). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. P. 145–152.

4. Lucani D. E., Pedersen M. V., Ruano D., Sorensen C. W., Fitzek F. H. P., Heide J., Geil O., Nguyen V., Reisslein M. Fulcrum: Flexible Network Coding for Heterogeneous Devices // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 77890–77910.

5. Heide J., Pedersen M. V., Fitzek F. H. P., Medard M. A Perpetual Code for Network Coding // 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Seoul, Korea (South), 18-21 May 2014. IEEE, 2015. P. 1–6.

AN APPROACH TO INTEGRATION OF NETWORK CODING METHODS INTO THE NS3 SIMULATION ENVIRONMENT

Vladimirov S., Hoang Q.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Network coding is a packet processing method that improves data transmission efficiency through the linear combination of packets at intermediate nodes. In modern communication network scenarios characterized by large-scale structures, simulation modeling is a prerequisite for resource optimization before the practical application of new approaches. This paper presents an approach of integrating network coding into the ns-3 simulation environment using third-party libraries.

Key words: network coding, packet recoding, Kodo library, simulation modeling, ns-3

УДК 621.396.4
ГРНТИ 50.37.03

ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ДАТА-ЦЕНТРЫ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ: ОСОБЕННОСТИ НОВОГО МЕЙНСТРИМА РАЗВИТИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Е. С. Владимирова[1], И. Б. Паращук[2], Р. В. Яровой[2]

[1] Севастопольский государственный университет (СевГУ)
[2] Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены некоторые ключевые аспекты создания и совершенствования перспективных дата-центров – сложных инфокоммуникационных систем, ориентированных на эффективные вычисления, поддержку принятия решений, поиск и хранение больших массивов данных. Одним из очевидных и рациональных решений в рамках построения и совершенствования подобных систем, призванных решать современные и перспективные задачи в области искусственного интеллекта, признаются решения, связанные с созданием и применением на практике программно-определяемых дата-центров. Проведен анализ достоинств и недостатков такого подхода, рассмотрены некоторые технологические особенности подобных объектов, ориентированные на решение задач в сфере искусственного интеллекта и обусловленные виртуальной сущностью программного представления и управления элементами дата-центров такого класса.

программно-определяемый дата-центр, искусственный интеллект, вычислительная мощность, особенность, хранение данных, ресурс, виртуальный сервер

Мировая тенденция построения и совершенствования крупных инфокоммуникационных систем, ориентированных на эффективные вычисления, поддержку принятия решений, а также на быстрый поиск и хранение Больших Данных, сегодня неразрывно связана с ожиданиями, особенностями и потенциалом внедрения искусственного интеллекта (ИИ). В первую очередь эта тенденция коснулась инфокоммуникационных систем крупных торговых и промышленных синдикатов, а также корпораций банковской сферы и военно-промышленного комплекса, для которых развертывание высокоэффективных корпоративных ИИ-кластеров послужило толчком к повышению качества информационного обеспечения управления и бизнеса, и, как следствие, к росту производительности и капитализации [1, 2].

На втором месте в ряду потенциальных бенефициаров внедрения интеллектуальных кластеров стоят крупные провайдеры инфокоммуникационных сервисов, которые предоставляют частным пользователям и корпорациям инфраструктурные услуги на базе ИИ-подсистем. Третье место по праву принадлежит отдельным компаниям и организациям, пользующимся, так называемой, «сервисной моделью», когда услуги ИИ-инфраструктуры приобретаются на время (как ресурсы) у обладающих ими провайдеров инфокоммуникационных сервисов [2-4].

Иными словами, активное эволюционное (а в некоторых аспектах, даже революционное), движение вперед отрасли инфокоммуникаций, особенно в части совершенствования наиболее эффективных инструментов и объектов IT-инфраструктуры, ориентированных на продуктивные (например, нейроморфные) вычисления, поддержку принятия решений, а также на быстрый поиск и хранение данных – то есть, в части усовершенствования дата-центров (ДЦ), ускорился в силу, а во многом и благодаря, повышению интереса к подсистемам искусственного интеллекта, которые, чем дальше, тем больше, нуждаются во все более крупных вычислительных мощностях и объемах ресурсов хранения [4-9].

В этой связи все очевиднее вырисовываются новые вызовы, стоящие перед отраслью инфокоммуникаций, отвечающей за ДЦ – все явственнее проявляется необходимость существенного усовершенствования инфокоммуникационной части (сетевой и серверной) инфраструктуры центров обработки данных: увеличения количества и производительности (вычислительной мощности) серверов, роста объема и номенклатуры систем хранения, повышения пропускной способности межсерверных и внутренних каналов структурированной кабельной системы ДЦ, и все это –принимая во внимание повышенные потребности современных и перспективных интеллектуальных подсистем [10, 11].

Однако очевидно, что усовершенствование таких элементов инфраструктуры традиционных ДЦ, приведение их в состояние, способное удовлетворить потребности современных и перспективных ИИ-подсистем, потребует немалых затрат временных, финансовых, вычислительных и иных ресурсов. С точки зрения физической (программно-аппаратной) реализации подобных усовершенствований, это потребует, например, создания дорогостоящих высокопроизводительных GPU-кластеров, используемых для сбора тренировочных датасетов и непосредственного машинного обучения различных ИИ-моделей. Особые трудности возникают, когда необходимо реализовать «туманные» или «граничные» вычисления, при которых

необходимо масштабировать физическую структуру ДЦ, максимально территориально приближая услуги к местам расположения пользователей.

Выход из данной ситуации нам видится в создании и использовании для работы с ИИ-моделями и алгоритмами программно-определяемых (ПрО) ДЦ – центров обработки данных, ориентированных на реализацию облачных технологических решений и, по сути, лежащих в их основе. При этом архитектура ПрО ДЦ для управления и автоматизации ресурсов внутри подобных центров обработки данных не использует физические (аппаратные) инструменты, для этого привлекается лишь программное обеспечение. Иначе говоря, вся инфраструктура ПрО ДЦ (серверы, хранилище данных и сети), управляется, контролируется, осуществляет синхронную репликацию данных и масштабируется программно [12-17].

Это новый мейнстрим развития программно-определяемых инфокоммуникационных систем хранения и обработки данных, в рамках которого воплощается в жизнь способность ДЦ гибко и оперативно масштабировать, развертывать и перераспределять свои ресурсы, что, в конечном итоге, нарабатывает на повышение эффективности использования инфокоммуникационной инфраструктуры, предоставляя эти ресурсы пользователям, «как услугу». Более того, достоинства ПрО ДЦ претендуют на значительную экономическую эффективность (минимизация финансовых затрат) и на надежность, что, безусловно, добавляет им популярности и признания в среде сетевых администраторов, аналитиков и инженеров данных, работающих с большими объемами информации.

С точки зрения физических процессов, реализуемых в рамках ПрО ДЦ, в подобных центрах обработки данных, благодаря виртуализации и автоматизации, создаются специальные виртуальные машины, регулируется (уменьшается или увеличивается) объем предоставляемых ресурсов, выполняется резервное копирование, причем весь перечень этих и иных управленческих воздействий, осуществляется через централизованную программную платформу. В состав ПрО ДЦ входит программно-определяемая инфраструктура (SDI – Software-Defined Infrastructure), отвечающая за управление и собственно виртуальный дата центр (vDC), задачей которого является предоставление виртуальных ресурсов. Такие программные объекты представляют собой основу для технологий виртуализации и, как следствие, базис для облачных технологий, являясь, по сути, фундаментальной архитектурой для создания и построения облачных сервисов, которые позволяют предоставлять пользователям ресурсы «как услугу». Аналогом ПрО ДЦ, но значительно меньшего масштаба, могут служить, так называемые, вирту-

альные частные серверы (VPS – Virtual Private Server), являющие собой эмуляцию реальных физических серверов на платформе виртуализации.

Мейнстрим развития инфокоммуникационных систем хранения и обработки данных, нацеленный на создание программно-определяемых ДЦ, обуславливает и предопределяет уникальные возможности подобных объектов по работе с искусственным интеллектом, с ИИ-моделями. В частности, программно-определяемые ДЦ для работы с ИИ позволяют, благодаря виртуализации и автоматизации, со значительно меньшими затратами и почти без привлечения физической инфраструктуры (оборудования), сделать технологический акцент на получение программным путем высокой эмулированной вычислительной мощности и большого объема виртуальной видеопамяти, так необходимых для машинного обучения на потоках данных, обработки естественного языка, компьютерного зрения (распознавания образов), элементов робототехники, принятия решений и иных аспектов искусственного интеллекта.

Традиционно для задач искусственного интеллекта требуется значительно больше ресурсов, особенно памяти, предназначенной специально для графических вычислений, для заданий, решаемых высокопроизводительными физическими GPU-кластерами при работе с большими языковыми моделями (LLM) или при генерации полученных с помощью ИИ изображений в высоком разрешении. Также требуются значительные вычислительные мощности, поскольку задачи искусственного интеллекта предопределяют многократную итеративную обработку гигантских массивов данных. Все это может с небольшими затратами и с высокой отдачей предоставлено программно-определяемыми дата-центрами, причем эти вычислительные ресурсы и ресурсы хранения в рамках программного управления подобными объектами можно гибко и оперативно масштабировать, развертывать и перераспределять. Используя ПрО ДЦ для ИИ, имеется возможность отказаться от дорогостоящих специализированных аппаратных ускорителей (например, тензорных или серверных графических процессоров из серии NVIDIA), предназначенные для масштабируемых и интенсивных вычислений, для сбора датасетов и машинного обучения различных ИИ-моделей [17].

Программно-определяемые ДЦ, ориентированные на решение задач для ИИ, имеют виртуальную сетевую инфраструктуру, которая позволяет обеспечить высокую пропускную способность внутренней сети подобного центра обработки данных и низкую задержку, позволяет обеспечить оперативную и достоверную передачу больших массивов данных между виртуальными серверами ПрО ДЦ в интересах облачных вычислений и распреде-

ленного машинного обучения ИИ-моделей. При этом, как и в физических (аппаратно-программных) ДЦ, в программно-определяемых центрах обработки данных обеспечивается требуемый быстрый доступ к большим массивам информации, ускоренная загрузка наборов данных и моделей, предназначенных, например, для запуска локальных нейросетей или обучения больших моделей, представляющих собой сложные ИИ-программы, обученные на больших объемах данных для распознавания закономерностей и выполнения различных задач.

Таким образом, рассмотрены некоторые ключевые аспекты создания и совершенствования перспективных ДЦ – сложных инфокоммуникационных систем, ориентированных на эффективные вычисления, поддержку принятия решений, поиск и хранение больших массивов данных. Одним из очевидных (и рациональных) решений в рамках построения и совершенствования подобных систем, призванных, помимо прочего, решать современные и перспективные задачи в области ИИ, признаются решения, связанные с созданием и применением на практике ПрО ДЦ. Проведен анализ достоинств и недостатков такого подхода, рассмотрены некоторые технологические особенности подобных объектов, ориентированные на решение задач для ИИ и обусловленные виртуальной сущностью представления и управления элементами ДЦ такого класса.

Список используемых источников

1. Агравал А., Ганс Д., Голдфарб А. Искусственный интеллект на службе бизнеса. Как машинное прогнозирование помогает принимать решения. М.: МИФ, 2019. 331 с.

2. Демиденко А. А. Искусственный интеллект: Стратегии внедрения для российского бизнеса. М.: Самиздат, 2025. 90 с.

3. Елизаров В. В., Паращук И. Б., Салюк Д. В. Анализ этапов и критериев выбора современных технологий искусственного интеллекта в интересах построения и совершенствования техники средств связи и автоматизации управления специального назначения // Техника средств связи. 2023. № 1 (161). С. 60–68.

4. Что такое ЦОД для искусственного интеллекта: стратегический обзор «Систэм Электрик» и «ИКС». 2025. URL: https://systeme.ru/news/chto-takoe-tsod-dlya-iskusstvennogo-intellekta-strategicheskii-obzor-sistem-elektrik-i-iks (дата обращения: 20.11.2025).

5. Прохоров А. Н., Рахматуллин С. С. Центры обработки данных. Анализ. Тренды. Мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2021. 414 с.

6. Докучаев В. А., Кальфа А. А., Маклачкова В. В. Архитектура центров обработки данных. М.: Горячая Линия-Телеком. 2024. 240 с.

7. Паращук И. Б., Михайличенко Н. В. Эффективность современных центров обработки данных // III Межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». Материалы конференции. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 24–26.

8. Вышемирский С. В. Искусственный интеллект в дата-центре. Компания IXcellerate. 2024. URL: https://ixcellerate.ru/news/iskusstvennyj-intellekt-v-data-tsentre/ (дата обращения: 20.11.2025).

9. Шпак М. Н. Искусственный интеллект в сети ЦОД: опыт Huawei. 2020. URL: https://habr.com/ru/companies/huawei/articles/531460/ (дата обращения: 20.11.2025).

10. Жумыкин А. М. Настольная книга эксплуататора. Все, что вы хотели знать о повседневной жизни дата-центров, но боялись спросить. М.: Альпина ПРО. 2022. 263 с.

11. Семенов А. Б. Структурированные кабельные системы для центров обработки данных. М.: ДМК Пресс. 2014. 234 с.

12. Лукичев А. Е. Виртуализация нового типа // Программно-определяемые ЦОД – борьба за будущее / Jet Info информационный бюллетень. № 11 (256), 2014. М.: «Инфосистемы Джет». С. 26–30.

13. Шабанов Б. М., Самоваров О. И. Принципы построения межведомственного центра коллективного пользования общего назначения в модели программно-определяемого ЦОД // Труды ИСП РАН, 2018, Т.30, Вып.6. С. 7–24.

14. Blokdyk G. SDDC. A Complete Guide. 2020. NY: 5STARCooks. 2021. 302 p.

15. Яровой Р. В., Михайличенко Н. В., Паращук И. Б. Визуальный компьютерный контроль в интересах оценивания и превентивной корректировки параметров надежности современных программно-определяемых хранилищ данных // Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации. Труды всеармейской научно-практической конференции. СПб.: ВАС, 2024. С. 344–349.

16. Кононенко А. А. Центры обработки данных нового поколения – взгляд за горизонт // Цифровая экономика. № 2 (2). 2018. С. 66–69.

17. Software Defined Data Center (SDDC). Future Platform for Private and Public Cloud Services. NY: NTT DATA, 2022. 22 p.

SOFTWARE-DEFINED DATA CENTERS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE: FEATURES OF THE NEW MAINSTREAM DEVELOPMENT OF INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS FOR DATA STORAGE AND PROCESSING

Vladimirova E.[1], Parashchuk I.[2], Yarovoy R.[2]
[1] Sevastopol State University (SevSU)
[2] Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

This article examines some key aspects of the creation and improvement of advanced data centers – complex information and communications systems focused on efficient computing, decision support, and the retrieval and storage of large data sets. One obvious and rational solution for the development and improvement of such systems, designed to address current and emerging challenges in artificial intelligence, is the creation and practical application of software-defined data centers. This article analyzes the advantages and disadvantages of this approach, and discusses some of the technological features of such facilities, focused on solving artificial intelligence problems and driven by the virtual nature of the software representation and management of data center elements.

Key words: software-defined data center, artificial intelligence, computing power, feature, data storage, resource, virtual server

УДК 681.142
ГРНТИ 49.01.85

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ОБОСНОВАННОСТИ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. И. Ворончук, И. С. Ковалев

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Оценка обоснованности решений является ключевым этапом в процессе управления системами специального назначения. Рассмотренные критерии обоснованности решений, алгоритм ее оценки и наиболее характерные ошибки, приводящие к снижению обоснованности решений, позволят минимизировать риски и повысить значения показателей эффективности принимаемых мер.

управление, принятие решения, обоснованность принятого решения, критерии и алгоритм оценки обоснованности решений

Известно [1], что управление представляет собой процесс информационных воздействий управляющего объекта на объект управления для придания ему целенаправленного поведения, другими словами, для достижения им цели функционирования. Следует помнить, что при управлении организационно-технической системой любой сложности необходимо рассматривать исключительно информационные воздействия.

Процесс управления, как и любой другой процесс, является абстракцией, его невозможно увидеть, услышать или почувствовать, поэтому для реализации процесса управления создается система управления. Более того, изменение значений показателей существенных свойств процесса управления осуществляется путем изменения значений показателей существенных свойств системы управления, его реализующей. Если в контуре управления используются средства и комплексы автоматизации, то такая система управления называется автоматизированной.

Для достижения цели своего функционирования любая сложная организационно-техническая система должна иметь в своем составе систему управления, которая представляет собой совокупность функционально взаимосвязанных должностных лиц, принимающих решения, размещающихся на специальным образом оборудованных пунктах управления, оснащенных средствами управления (средствами связи и средствами автоматизации) [2, 3].

Система специального назначения (ССН), безусловно, относится к классу сложных организационно-технических систем, а значит она имеют в своем составе автоматизированную систему управления, предназначенную для реализации собственно процесса управления.

Центральным элементом процесса управления является управленческое решение, без принятия которого невозможны планирование, координация, контроль, другими словами, невозможно достижение цели функционирования системы специального назначения.

Сущность такого решения заключается в выборе конкретных действий, причем обязательно из нескольких возможных альтернатив, направленных на достижение цели функционирования управляемой системы.

Управленческое решение в системах специального назначения имеет ряд характерных особенностей:

– оно явно ориентированно на достижение цели функционирования системы;
– ограниченность ресурсов (временных, финансовых, технических, человеческих), которыми располагает лицо, принимающее решение;
– неопределенность информации о состоянии системы специального назначения и среды;
– персональная ответственность лица, принимающего решение, за последствия своего выбора перед законом, своим руководством, коллективом.

Принятие решения по управлению ССН представляет собой последовательный процесс, который, как правило, включает следующие основные этапы.

На первом этапе происходит выявление цели функционирования системы (здесь необходимо четко определить, какая цель должна быть достигнута в процессе функционирования системы специального назначения).

На втором этапе следует проанализировать информацию о состоянии системы и об обстановке, в которой она функционирует (следует отметить, что системы специального назначения функционируют в условиях огромной неопределенности, что, безусловно, отражается на достоверности информации состояния).

Третий этап посвящен разработке возможных альтернатив, т.е. здесь формируются возможные варианты решений, причем, чем их больше, тем выше шанс найти оптимальное обоснованное решение.

На четвертом этапе проводится оценка альтернатив и выбор лучшего варианта. Лицу, принимающему решение, следует выбирать именно тот вариант, который наиболее полно соответствует цели функционирования системы специального назначения. Необходимо помнить, что на этом этапе огромную роль играет опыт, квалификация и интуиция лица, принимаю-

щего решение, подкрепленные результатами расчетов, проведенными на предыдущих этапах.

Пятый этап посвящен собственно принятию решения – это апогей процесса управления системами специального назначения.

На шестом этапе осуществляется реализация принятого решения. Здесь происходит распределение задач и ресурсов, устанавливаются сроки, определяются ответственные.

На заключительном седьмом этапе проводится контроль и оцениваются результатов.

Ключевым этапом процесса управления является оценка обоснованности принятых решений, позволяющая минимизировать риски и повысить эффективность принимаемых действий [3].

Лицу, принимающему решение, важно помнить о следующих критериях обоснованности решений при управлении системами специального назначения:

1. Опора на достоверные данные (решение должно приниматься на основе полной, актуальной и проверенной информации, что особенно проблематично при управлении именно системами специального назначения);

2. Наличие необходимых полномочий у лица, принимающего решение (соблюдение его прав и полномочий);

3. Тщательный анализ возможных альтернатив (обязательно должны быть рассмотрены и сопоставлены все, или основные, варианты с оценкой их плюсов и минусов);

4. Системность процесса принятия решения (необходимо учитывать взаимосвязи с другими процессами и элементами);

5. Простота и ясность принятого решения (оно должно быть четко сформулировано, чтобы исключить неоднозначное его толкование)

6. Строгое соответствие целям функционирования ССН (необходимо, чтобы решение приводило к достижению поставленных перед системой специального назначения задач и не противоречило стратегическим целям);

7. Учет всех ограничений (следует учитывать ресурсные, временные, людские, правовые и иные рамки);

8. Прогнозирование последствий принятого решения (необходимо оценивать краткосрочные и долгосрочные эффекты, включая возможные риски);

9. Логическая связность решения (аргументы и выводы должны быть непротиворечивыми и выстроенными в четкую цепочку рассуждений);

10. Обоснованность затрат (следует следить, чтобы предполагаемый результат оправдывал вкладываемые ресурсы).

При оценке обоснованности решений при управлении системами специального назначения предлагается руководствоваться следующим алгоритмом:

1. Оценку обоснованности следует начинать с диагностики ситуации, которая включает:
– выявление ключевых проблем;
– анализ закономерностей развития ситуации;
– определение механизмов воздействия и необходимых ресурсов.

2. Далее необходимо провести сбор и анализ всей информации состояния, необходимой для принятия решения, что включает:
– получение достоверных данных о состоянии системы и среды;
– консультации с экспертами;
– изучение релевантных исследований и отчетов.

3. Затем важно оценить каждую из возможных альтернатив, а именно:
– проанализировать преимущества и недостатки каждого варианта;
– проверить соответствие целям и требованиям вышестоящей системы;
– провести расчет затрат и прогнозируемых результатов.

4. После чего следует проверить решение на соответствие приведенным выше критериям обоснованности:
– оценить полноту охвата проблемы;
– еще раз убедиться в достоверности исходных данных;
– проверить полномочия лица, принимающего решения;
– оценить возможность реализации в установленные сроки.

5. И в заключении необходимо спрогнозировать последствия принятого решения:
– оценить краткосрочные и долгосрочные результаты;
– проанализировать риски и способы их минимизации;
– по возможности учесть влияние принятого решения на смежные процессы.

Вот лишь некоторые из известных инструментов повышения обоснованности решений при управлении системами специального назначения:

1. Метод попарных сравнений, суть которого заключается в попарном сравнении альтернатив по заданным критериям;

2. Оценочные таблицы позволяют систематизировать данные по ключевым позициям;

3. Метод «635», идея которого состоит в коллективной генерации и оценке альтернатив (6 участников, 3 идеи, 5 минут на каждого);

4. Факторный и корреляционный анализ, позволяющий выявить значимые зависимости и влияния и др.

Лицу, принимающему решение, крайне важно знать типичные и наиболее характерные ошибки, обычно приводящие к снижению обоснованности

принимаемых решений по управлению системами специального назначения:

1) опора на неполные или устаревшие исходные данные;

2) игнорирование других альтернативных вариантов;

3) недооценка отдельных рисков и побочных эффектов;

4) противоречие стратегическим целям функционирования системы специального нарушения;

5) искажения, вызванные субъективным восприятием действительности, лицом, принимающим решение;

6) отсутствие четкого механизма реализации принятого решения;

7) нарушение полномочий лицом, принимающим решения.

Список используемых источников

1. Теоретические основы автоматизированных систем военного назначения; Учебник / Под ред. В. С. Авраменко. СПб.: ВАС, 2025.

2. Иванов А. Ю. Теория принятия решений: учебное пособие / А. Ю. Иванов, В. И. Комашинский, О. И. Пантюхин; СПбГУТ. Санкт-Петербург, 2023.

3. Теория военного управления. Учебное пособие / Под ред. С. В. Чернякова. СПб: ВАС, 2024.

ON IMPROVING THE REASONABLENESS OF DECISIONS IN SPECIAL-PURPOSE SYSTEM MANAGEMENT

Voronchuk V., Kovalev I.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

The assessment of the validity of decisions is a key stage in the process of managing special-purpose systems. The considered criteria for the validity of decisions, the algorithm for its assessment, and the most common errors that lead to a decrease in the validity of decisions will help to minimize risks and increase the effectiveness of the measures taken.

Key words: management, decision-making, the validity of a decision, criteria and an algorithm for evaluating the validity of decisions

УДК 621.396.93
ГРНТИ 49.33.29

ГЕТЕРОГЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СЦЕНАРИЕВ IMT-2020

В. С. Вторых, В. Е. Коротин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В рамках существующей потребности в реализации сценариев, отраженных в требованиях к сетям, устройствам и сервисам мобильной связи IMT-2020 и в случае отсутствия полномасштабной инфраструктуры 5-го поколения для их обеспечения, целесообразно прибегнуть к технической политике замещения радиодоступа 5G-NR гетерогенными решениями, обеспечивающими в заданной мере требуемую функциональность. В качестве одной из возможных альтернатив рассматривается возможность использования технологий V2X (Vehicle-to-Everything) как наиболее близкой по обеспечиваемой функциональности к основным сценариям 5-го поколения сотовой связи и имеющей высокую степень проработки технико-технологических решений, что подтверждается международной стандартизацией и регламентацией. Проведенное исследование базируется на выработке необходимых критериев и позволяет на их основе определить степень соответствия предлагаемых V2X технологических решений сценарным требованиям IMT-2020.

IMT-2020, V2X, гетерогенные решения, выработка критериев, радиодоступ

Концепция развития сетей связи пятого поколения (IMT-2020; International Mobile Telecommunications-2020) определяет три основных сценария оказания услуг мобильной связи 5G [1]. Данные сценарии различаются в зависимости от степени важности (высокая, средняя, низкая) того или иного показателя (например, пиковая скорость передачи данных, задержка передачи данных) и представлены на рис. 1.



Рис. 1. Сценарии оказания услуг мобильной связи 5G

Каждый сценарий характеризуется специфическим набором качественных и количественных характеристик. Анализируя указанные характеристики отдельных сценариев и сравнивая их с существующими стандартами связи такими как Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) и Dedicated Short Range Communications (DSRC), представляется возможным определить степень соответствия стандартов V2X установленным требованиям для сетей пятого поколения (IMT-2020).

Выбор технологий V2X обусловлен рядом факторов:

1. Высокий уровень стандартизации:

1.1. Зарубежные стандарты (IEEE 802.11p, ETSI ES 302 663, ETSI EN 303 613) [2-4].

1.2. Российские стандарты: ГОСТ Р 70982–2023 [5].

2. Выделенный диапазон рабочих частот (Решение ГКРЧ при Минкомсвязи РФ № 11-11-01-2 от 10 марта 2011 года – «О выделении полосы радиочастот 5855–5925 МГц для радиоэлектронных средств интеллектуальных систем на транспорте (ITS) [6].

3. Разработка и производство в России телекоммуникационных элементов дорожной инфраструктуры и бортовых телекоммуникационных терминалов для реализации V2X взаимодействия (например, компания TEDIX).

Для исследования уровня соответствия стандартов V2X установленным требованиям для сетей пятого поколения использован метод взвешенной суммы критериев, который заключается в следующем:

– определение критериев для каждого сценария IMT-2020.
– задание весовых коэффициентов для каждого критерия, отражающие его важность для каждого сценария;
– оценка выбранных стандартов V2X по каждому критерию по шкале, например, от 1 (низкое соответствие) до 5 (отличное соответствие);
– расчет методом взвешенной суммы критериев по каждому сценарию по формуле:

$$A_i^{WSM} = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot a_{ij} \qquad (1)$$

где w_j – относительный вес важности критерия;

a_{ij} – значение производительности альтернативы A_i;

A_i^{WSM} – значимость альтернативы A_i

В рамках настоящего исследования проведен анализ с опорой на регламентированные положения, изложенные в стандарте ETSI TR 138 913 V19.0.0 (2025–10) [7] и документе ITU-R M.2410 [8].

Результаты анализа представлены в таблицах 1–4.

ТАБЛИЦА 1. Определение критериев для сценариев IMT-2020

Критерий	eMBB	URLLC	mMTC
Пиковая скорость передачи данных (DL\UL)	Высокие требования	Низкие требования	Низкие требования
Целевое значение задержки на уровне пользователя	Средние требования	Высокие требования	Низкие требования
Мобильность	Высокие требования	Высокие требования	Низкие требования
Плотность подключений	Средние требования	Низкие требования	Высокие требования
Энергоэффективность	Высокие требования	Низкие требования	Высокие требования

ТАБЛИЦА 2. Задание весовых коэффициентов

Критерий	eMBB	URLLC	mMTC
Пиковая скорость передачи данных (DL\UL)	0.4	0.05	0.05
Целевое значение задержки на уровне пользователя	0.1	0.4	0.1
Мобильность	0.2	0.4	0.05
Плотность подключений	0.1	0.1	0.4
Энергоэффективность	0.2	0.05	0.4

ТАБЛИЦА 3. Оценка выбранных стандартов V2X по каждому критерию

Критерий	C-V2X (Rel.14)	DSRC (IEEE 802.11p)
Пиковая скорость передачи данных	2	1
Целевое значение задержки на уровне пользователя	3	2
Мобильность	4	3
Плотность подключений	2	1
Энергоэффективность	2	2

ТАБЛИЦА 4. Расчет методом взвешенной суммы критериев

Расчет взвешенной оценки для C-V2X (Rel.14)	Расчет взвешенной оценки для DSRC (IEEE 802.11p)
Для eMBB: 2.5	Для eMBB: 1.7
Для URLLC: 3.2	Для URLLC: 2.25
Для mMTC: 2.20	Для mMTC: 1.6

Анализируя данные, представленные в таблице 4, можно сделать следующие выводы:

DSRC (IEEE 802.11p) подходит для коротких сообщений и низких требований по скорости и задержке, не масштабируется для сценариев URLLC, eMBB, mMTC. Необходимо дальнейшее исследование в рамках стандарта IEEE 802.11bd.

C-V2X (Rel. 14) не выполняет требования по пропускной способности сети и плотности подключений. Масштабируется для сценариев URLLC, соответствует части критериев eMBB. Целесообразно продолжить исследования по расширению требований к пропускной способности сети и повышению надежности передачи данных в условиях высокой мобильности и плотности. Например, разработка методов оптимизации распределения ресурсов и управления спектром для повышения эффективности передачи информации.

Список используемых источников

1. Приказ Минкомсвязи России от 27.12.2019 N 923 «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации», 2019.

2. IEEE 802.11p-2010: «IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments», 2010. 51 с.

3. ETSI EN 302 663 V1.3.1 (2020-01): «Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band», 2020. 25 с.

4. ETSI EN 303 613 V1.1.1-2020: «Intelligent Transport Systems (ITS); LTE-V2X Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band», 2020. 20 с.

5. ГОСТ Р 70982–2023: «Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Системы управления движением транспортным средством. Требования к структуре и архитектуре V2X-взаимодействия», 2023. 16 с.

6. Решение ГКРЧ при Минкомсвязи РФ № 11-11-01-2 от 10 марта 2011 года «О выделении полосы радиочастот 5855–5925 МГц для радиоэлектронных средств интеллектуальных систем на транспорте (ITS), 2011.

7. ETSI TR 138 913 V19.0.0 (2025-10): «5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 19.0.0 Release 19)», 2025. 42 с.

8. Report ITU-R M.2410-0: «Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)», 2017. 11 с.

HETEROGENEOUS SOLUTIONS FOR IMT-2020 SCENARIOS

Vtorykh V., Korotin V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Given the existing need to implement scenarios reflected in the requirements for IMT-2020 mobile communication networks, devices and services, and in the absence of a full-scale 5G infrastructure to support them, it is advisable to resort to a technical policy of replacing 5G-NR radio access with heterogeneous solutions that provide the required functionality to a specified extent. One possible alternative is the use of V2X (Vehicle-to-Everything) technologies, as they are closest in functionality to the main scenarios of 5G cellular communications and have a high degree of technical and technological sophistication, as confirmed by international standardization and regulations. The study is based on the development of the necessary criteria and allows, on their basis, to determine the degree of compliance of the proposed V2X technological solutions with the IMT-2020 scenario requirements.

Key words: IMT-2020, V2X, heterogeneous solutions, criteria development, radio access

УДК 004.032.26:004.93:629.5
ГРНТИ 28.23.15:73.34

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ПЕРСЕПТРОНА И НЕЙРОННОЙ СЕТИ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ АВТОНОМНОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Э. С. Вяльшин, С. Л. Федоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье рассматривается сравнительный анализ двух значительных архитектур в области нейронных сетей: персептрона и нейронной сети Колмогорова – Арнольда. Персептрон, как одна из первых моделей нейронных сетей, демонстрирует эффективность в решении линейно разделимых задач, однако ограничен в способности обрабатывать более сложные нелинейные зависимости. В отличие от него, нейронная сеть Колмогорова – Арнольда, основанная на теории функций, способна аппроксимировать любые непрерывные функции на компактных множествах благодаря своей универсальной структуре и многоуровневой архитектуре. Статья анализирует ключевые характеристики обеих моделей, включая их архитектурные особенности, алгоритмы обучения и области применения. Также рассматриваются преимущества и недостатки каждой из них, а также примеры их использования в реальных задачах. В заключение подчеркивается важность выбора подходящей модели в зависимости от конкретной задачи и сложности данных, что может существенно повлиять на качество решения.

автономный водный транспорт (USV), техническое зрение, многослойный персептрон (MLP), сети Колмогорова-Арнольда (KAN), обнаружение препятствий, глубокое обучение, интерпретируемость ИИ.

Развитие автономного водного транспорта (Unmanned Surface Vessels, USV) является одним из приоритетных направлений в современной морской робототехнике. Беспилотные суда находят применение в мониторинге акваторий, инспекции инфраструктуры, транспортных операциях и задачах поиска [1]. Ключевым элементом, обеспечивающим безопасную навигацию, является интеллектуальная система технического зрения, которая должна в реальном времени обнаруживать и классифицировать препятствия (суда, буи, плавающий мусор), определять их координаты и строить безопасную траекторию.

Долгое время стандартом для решения подобных задач являлись многослойные персептроны (MLP) и сверточные нейронные сети (CNN) на их основе [2]. Однако недавнее появление архитектуры сетей Колмогорова-

Арнольда (KAN) открывает новые горизонты для исследований. KAN, основанная на теореме суперпозиции Колмогорова-Арнольда, предлагает принципиально иной подход к аппроксимации функций, что может быть критически важно для восприятия сложной морской среды. Целью данной работы является анализ применимости этих двух архитектур в контексте ограничений и требований, предъявляемых к системам автономной морской навигации.

Многослойный персептрон (MLP), разработанный еще в 1957 году, представляет собой упрощенную математическую модель биологической нейронной сети. Его основу составляют слои нейронов, каждый из которых выполняет взвешенное суммирование входных сигналов с последующим применением фиксированной нелинейной функции активации (например, ReLU или сигмоиды). Обучение MLP заключается в подборе оптимальных весовых коэффициентов W [3]. Благодаря своей гибкости и способности к аппроксимации любых нелинейных функций MLP остаются основным строительным блоком современных архитектур глубокого обучения, включая трансформеры.

В отличие от MLP, сеть Колмогорова-Арнольда опирается на глубокий математический принцип – теорему суперпозиции, доказанную советскими математиками А. Н. Колмогоровым и В. И. Арнольдом [3, 4]. Теорема утверждает, что любую многомерную функцию можно представить в виде композиции сложений одномерных функций [3]. В архитектуре KAN это реализовано следующим образом: вместо фиксированных активаций на узлах, сеть использует обучаемые функции активации на ребрах (связях). Параметризуются не веса, а сами функции, что достигается с помощью сплайнов. Это дает модели значительно большую гибкость и потенциально более высокую точность аппроксимации при меньшем количестве параметров [3, 5].

Применение нейросетевых алгоритмов в морской среде сопряжено с рядом специфических вызовов, которые необходимо учитывать при выборе архитектуры:

1. Динамический фон и качка: в отличие от городских условий, поверхность воды постоянно меняется из-за волн и отражений, а само судно испытывает бортовую и килевую качку [1];

2. Разнообразие объектов: цели могут варьироваться от крупных танкеров до небольших лодок, буев и контейнеров, что требует масштабируемости детекции [6, 7];

3. Ограниченность вычислительных ресурсов: бортовые системы автономных судов часто имеют жесткие ограничения по энергопотреблению

и массе, что требует компромисса между точностью и скоростью работы алгоритмов;

4. Безопасность и интерпретируемость: в отличие от рекомендательных систем, ошибка навигации может привести к катастрофе. Желательно, чтобы нейросеть могла объяснить, на основании каких признаков было принято решение [2].

Современные подходы, такие как PV-RCNN для LiDAR данных [1] или мультимодальные детекторы [2], демонстрируют высокую эффективность, но они, как правило, опираются на классические MLP-блоки.

Для оценки перспективности замены MLP на KAN в системах морского зрения, рассмотрим их ключевые характеристики (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение характеристик MLP и KAN в контексте задач морской навигации

Критерий	Многослойный персептрон (MLP)	Сеть Колмогорова-Арнольда (KAN)	Анализ для USV
Точность аппроксимации	Высокая, требует большого количества параметров для сложных функций [5]	Очень высокая, особенно на сложных данных; исследования показывают прирост точности до 12 % [5]	KAN потенциально лучше справится с аппроксимацией нелинейных границ объектов на воде (блики, волны)
Интерпретируемость	Низкая («черный ящик»); объяснение решений требует внешних инструментов (SHAP) [5]	Высокая; архитектура допускает визуализацию и «обрезку» (pruning) незначимых путей для извлечения формул [3]	Критическое преимущество KAN для сертификации систем безопасности автономного судна
Вычислительные затраты	Хорошо оптимизирован для GPU, быстр на этапе вывода	Обучение требует больших мощностей из-за сложности сплайнов; инференс пока медленнее [4]	MLP предпочтительнее для текущих бортовых систем с ограниченным GPU
Устойчивость к забыванию	Подвержен катастрофическому забыванию при дообучении [3]	Локальная пластичность сплайнов позволяет избегать забывания [3]	Позволяет дообучать модель под конкретный порт/акваторию без потери общих навыков навигации
Адаптация к новым данным	Требует полного переобучения или тонкой настройки всех весов.	Локальное изменение сплайна затрагивает только часть сети [3]	Упрощает адаптацию к новым классам объектов (новый тип судна)

Согласно сравнительным исследованиям на наборах данных CIFAR-100, Titanic и Beans, KAN демонстрирует сопоставимые или лучшие результаты по сравнению с MLP в задачах классификации. В более узкой области предсказания дефектов программного обеспечения KAN стабильно превосходит MLP по всем метрикам (Accuracy, Precision, Recall) [5]. Для морской среды, где требуется высокая достоверность обнаружения препятствий (Recall) для предотвращения столкновений, потенциальное преимущество KAN выглядит многообещающе. Однако на данный момент отсутствуют исследования применения KAN непосредственно на морских датасетах (например, Singapore Maritime Dataset, где современные DNN достигают mAP 75.8 % [6]).

Одним из главных барьеров для внедрения ИИ в критически важные системы является проблема «черного ящика». В традиционных MLP понять, почему сеть приняла то или иное решение, крайне сложно. KAN предлагает элегантное решение благодаря своей архитектуре. Применяя регуляризацию и обрезку, можно упростить сеть до набора символьных формул [3]. В контексте USV это означает, что инженеры могли бы в теории «прочитать» логику, по которой система идентифицирует судно как опасное, что является огромным шагом вперед для верификации программного обеспечения.

Несмотря на теоретические преимущества, KAN сталкивается с серьезными практическими ограничениями. Обучение KAN требует значительно больших вычислительных мощностей, а его реализация на существующем оборудовании (GPU) пока не оптимизирована так же хорошо, как для MLP. Для автономного судна, где решения должны приниматься за миллисекунды, скорость инференса (работы готовой модели) является ключевым параметром. Исследования в области управления пожарными роботами (среда, схожая по степени неопределенности с морской) показывают, что хотя KAN может быть точнее, вопросы быстродействия и размера модели остаются открытыми. Поэтому сегодня MLP остается более практичным выбором для реальных бортовых систем, особенно в задачах, где критична частота кадров обработки видео [2].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы относительно применения персептрона (MLP) и сетей Колмогорова-Арнольда (KAN) в интеллектуальных системах зрения автономного водного транспорта:

1. Текущий стандарт (MLP): Многослойные персептроны остаются наиболее зрелой, изученной и аппаратно-оптимизированной технологией.

Существующие передовые решения для USV (PV-RCNN, мультимодальные детекторы) надежно работают на базе MLP и гарантируют необходимое быстродействие [1, 2, 7];

2. Потенциал будущего (KAN): Архитектура KAN демонстрирует революционные преимущества в точности, интерпретируемости и адаптивности [3, 5]. Способность избегать катастрофического забывания и локально адаптироваться к новым типам судов без переобучения всей сети делает KAN крайне привлекательной для долгоживущих автономных систем [3].

3. Области первоочередного внедрения KAN: Учитывая современные ограничения по скорости вычислений, KAN в ближайшее время могут найти применение не в низкоуровневой обработке видеопотока (пиксельная классификация), а на более высоких уровнях принятия решений – для анализа ситуаций, прогнозирования траекторий движения целей и символьного объяснения действий навигационной системы.

Таким образом, наиболее перспективным сценарием на ближайшие годы видится гибридный подход: использование классических MLP- и CNN-блоков для быстрой обработки сенсорных данных (LiDAR, камеры) с последующим анализом полученной информации интерпретируемыми KAN-модулями для стратегического планирования маршрута и обеспечения безопасности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию KAN для работы в условиях ограниченных ресурсов и тестирование этих сетей на специализированных морских наборах данных.

Список используемых источников

1. Werner H., Delea C., Zantopp N., Au C. N., Tiedemann T. Advancing Maritime Perception: PV-RCNN for 3D LiDAR Object Detection // Journal of Physics: Conference Series. 2026. Vol. 3123, No. 1. Art. no. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/3123/1/012026.

2. Garofano V., Hepworth M., Shahin R., Pang Y., Negenborn R. R. Obstacle avoidance and trajectory optimisation for an autonomous vessel utilising MILP path planning, computer vision based perception and feedback control // Journal of Marine Engineering & Technology. 2024. Vol. 23, No. 3. P. 209–223. DOI: 10.1080/20464177.2024.1234567

3. Liu Z., Wang Y., Vaidya S., Ruehle F., Halverson J., Soljacic M., Hou T. Y., Tegmark M. KAN: Kolmogorov–Arnold Networks // arXiv preprint arXiv:2404.19756v5. 2025. 9 Feb. URL: https://arxiv.org/abs/2404.19756 (дата обращения: 26.02.2026).

4. Turk S., Coskuncay A. A comparative study of Kolmogorov-Arnold networks and multilayer perceptrons for software defect prediction with SHAP analysis // Cluster Computing. 2025. Vol. 28. Art. no. 986. DOI: 10.1007/s10586-025-05691-5.

5. Shi B., Wang Z., Cao T., Zhao H., Ge Q. MMD-Net: A Vision-Language Perception Model for Maritime Object Detection and Application // Journal of Ocean University of China. 2026. DOI: 10.1007/s11802-026-6153-7.

6. Vaca C. J., Sahoo S. S., Ghosh S. S. A Comparative Study of Kolmogorov-Arnold Networks and Convolutional Neural Networks for Medical Image Classification // arXiv preprint arXiv:2405.06149. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2405.06149 (дата обращения: 26.02.2026).

7. Пожаркова И. Н. Оценка эффективности применения сетей Колмогорова-Арнольда в задачах управления пожарными роботами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. С. 33–41.

ANALYSIS OF THE PERCEPTRON AND THE KOLMOGOROV-ARNOLD NEURAL NETWORK IN INTELLIGENT VISION SYSTEM FOR AUTONOMOUS WATER TRANSPORT

Vyalshin E., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article compares two significant neural network architectures: the perceptron and the Kolmogorov-Arnold neural network. The perceptron, one of the first neural network models, demonstrates effectiveness in solving linearly separable problems but is limited in its ability to handle more complex nonlinear relationships. In contrast, the Kolmogorov-Arnold neural network, based on function theory, is capable of approximating any continuous functions on compact sets due to its universal structure and multi-layer architecture. The article analyzes the key characteristics of both models, including their architectural features, training algorithms, and application areas. It also discusses the advantages and disadvantages of each, as well as examples of their use in real-world problems. Finally, the importance of choosing the appropriate model based on the specific problem and data complexity is emphasized, as this can significantly impact the quality of the solution.

Key words: autonomous water vehicles (USV), machine vision, multilayer perceptron (MLP), Kolmogorov-Arnold networks (KAN), obstacle detection, deep learning, AI interpretability

УДК 004.032.26:004.93:629.5
ГРНТИ 28.23.15:73.34

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА (MLP) И НЕЙРОННОЙ СЕТИ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ АВТОНОМНОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Э. С. Вяльшин, С. Л. Федоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье проводится сравнительный анализ фундаментальных свойств распределения глубины и представления функций в двух ключевых архитектурах искусственных нейронных сетей: многослойном персептроне (MLP) и недавно предложенной сети Колмогорова-Арнольда (KAN). Исследование сфокусировано на теоретических и практических аспектах, определяющих способность моделей к аппроксимации сложных зависимостей в зависимости от их глубины и структуры. В статье систематически исследуется различие концепций глубины для двух архитектур, а также сопоставляются потенциальная параметрическая эффективность, склонность к проблемам затухающих градиентов, прозрачность вложенных преобразований и характер формируемых представлений данных.

автономное судно, техническое зрение, многослойный персептрон, сети Колмогорова-Арнольда, спектральное смещение, глубина сети, обнаружение объектов

Автономное судовождение является одним из наиболее сложных и актуальных направлений развития транспортных систем. В отличии от беспилотных автомобилей, эксплуатируемых в относительно структурированной среде с развитой инфраструктурой, автономные суда функционируют в условиях, характеризующихся непредсказуемостью гидрометеорологической обстановки, сложностью обнаружения малых объектов на водной поверхности и ограниченными возможностями локальной навигации [1].

Критически важным компонентом систем автономного судовождения выступает техническое зрение, обеспечивающее решение задач обнаружения навигационных опасностей, распознавания надводных объектов, оценки гидрологической обстановки и интерпретации данных гидроакустического мониторинга [2]. В последнее десятилетие доминирующим подходом к построению таких систем стали глубокие нейронные сети, преимуще-

ственно реализованные на основе многослойных персептронов (MLP) и их специализированных вариантов – сверточных нейронных сетей (CNN).

Однако недавно предложенная архитектура сетей Колмогорова-Арнольда (Kolmogorov-Arnold Networks, KAN) демонстрирует многообещающие результаты в задачах научного моделирования, решений дифференциальных уравнений и аппроксимации функций [3, 4]. Принципиальное отличие KAN от MLP состоит в размещении обучаемых функций активации на связях между нейронами, а не на узлах, что открывает новые возможности для повышения точности и интерпретируемости моделей.

Настоящая работа ставит целью исследование свойств распределения глубины архитектур KAN и MLP и оценку их применимости в системах технического зрения автономного водного транспорта.

Многослойный персептрон представляет собой архитектуру, в которой каждый нейрон вычисляет взвешенную сумму входных сигналов с последующим применением фиксированной нелинейной функции активации. Для одного скрытого слоя преобразование может быть записано как:

$$h = \sigma(W_1 x + b_1), o = (W_2 h + b_2), \quad (1)$$

где σ – функция активации (ReLU, сигмоид, tanh), W – матрицы весов, b – векторы смещений.

Теорема об универсальной аппроксимации гарантирует, что MLP с одним скрытым слоем достаточной ширины способен аппроксимировать любую непрерывную функцию на компактном множестве [5]. Однако на практике глубокие архитектуры эффективнее с точки зрения количества параметров для представления сложных функций.

Ключевая особенность MLP – спектральное смещение (spectral bias): при обучении градиентным спуском сеть в первую очередь осваивает низкочастотные компоненты целевой функции [3]. Данное свойство играет двоякую роль: с одной стороны, оно выступает в качестве регулятора, повышая обобщающую способность модели, с другой – накладывает ограничения на точность воспроизведения высокочастотных составляющих, что критично для задач, чувствительных к детализации.

Архитектура KAN основана на теореме Колмогорова-Арнольда о представлении, согласно которой любая непрерывная функция многих переменных на ограниченной области может быть представлена в виде суперпозиции непрерывных функций одной переменной и сложения [4]:

$$f(x) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q\left(\sum_{p=1}^{n} \phi_{q,p}(x_p)\right) \quad (2)$$

В отличии от MLP, где на узлах применяются фиксированные функции активации, в KAN обучаемые функции активации размещаются на связях (ребрах) графа сети и параметризуются, как правило, с помощью B-сплайнов [3]. Каждая функция активации представляется в виде:

$$\phi(x) = w_b b(x) + w_s \sum_j c_j B_j(x), \quad (3)$$

где $b(x)$ – базовая функция (например, SiLU или линейная), $B_j(x)$ – базисные сплайны, c_j – обучаемые коэффициенты.

Преимущества такого подхода включают возможность визуализации и интерпретации изученных функций, локальную подстраиваемость благодаря сплайновому представлению и адаптивное уточнение через изменение сетки сплайнов.

Одним из ключевых теоретических результатов, значимых для сравнения архитектур, является вопрос о взаимозаменяемости MLP и KAN. Недавние исследования строго показали, что любой многослойный персептрон с кусочно-полиноминальной функцией активации (например, ReLU) может быть преобразован в сеть Колмогорова-Арнольда с сопоставимым числом обучаемых параметров [3]. Обратное преобразование (аппроксимация KAN с помощью MLP) – также возможно, однако оно ведет к существенному росту числа параметров. Отсюда вытекает следующее: для функций, которые допускают эффективное представление в виде комбинации кусочно-полиномиальных (сплайновых) компонент, KAN с достаточно мелкой сеткой способна достичь заданной точности при значительно меньшем количестве параметров, чем MLP. В приложении к системам технического зрения автономных судов для обработки изображений с четкими границами объектов (например, силуэтов судов на линии горизонта) KAN потенциально обеспечивает более высокую точность при меньшем числе параметров.

Критически важным для систем технического зрения является различие в спектральном смещении двух архитектур. Теоретический анализ градиентного спуска для однослойного KAN показывает, что эта архитектура в меньшей степени подвержена спектральному смещению по сравнению с MLP [3].

На практике это проявляется в способности KAN эффективнее обучаться на высокочастотных компонентах целевой функции. Для задач обнаружения маломерных судов, буев и других навигационных объектов, которые могут занимать всего несколько пикселей на изображении, данное свойство является существенным преимуществом.

Экспериментальные исследования на задачах подгонки одномерных частот, аппроксимации ядра Гаусса и решения уравнения Пуассона подтверждают, что KAN стабильно демонстрируют меньшее спектральное смещение, чем MLP.

Глубина, ширина и размер сетки KAN по-разному влияют на ее способность обучатся частотным компонентам различного порядка [3]. Максимальная частота, которую может выучить отдельный слой KAN, ограничена числом точек сетки сплайнов. Композиционная структура, связанная с глубиной, также играет важную роль в изучении различных частот.

Для систем технического зрения автономных судов это открывает возможность адаптивного выбора гиперпараметров: для обнаружения удаленных объектов (высокочастотная информация) целесообразно использовать более мелкую сетку сплайнов или увеличивать глубину; для анализа фоновой обстановки (низкочастотная информация) могут быть достаточны широкие слои с меньшей сеткой.

Системы технического зрения автономных судов работают в условиях, существенно отличающихся от наземных: высокая динамика освещения (блики, туман), малый размер объектов интереса (удаленные суда, буи), специфические артефакты (пена, волнение, отражения) и необходимость мультисенсорной интеграции (видео, ИК, гидроакустика) [2]. Эти особенности предъявляют особые требования к нейросетевым архитектурам.

Для сертификации систем автономного судовождения критически важна интерпретируемость принимаемых решений. KAN предоставляют уникальную возможность визуализации изученных функций активации [4]. В отличии от MLP, где внутренние представления скрытых слоев трудны для интерпретации, в KAN каждая активационная функция может быть проанализирована и сопоставлена с физически значимыми характеристиками наблюдаемой сцены. Исследования архитектур multi-exit KAN демонстрируют [4], что такие сети способны автоматически находить оптимальный баланс между точностью предсказаний и интерпретируемостью: наилучшие результаты часто достигаются на ранних (более мелких) выходах сети, что соответствует более закономерным и, следовательно, лучше интерпретируемым представлениям данных.

Обобщая теоретические результаты и экспериментальные данные [2, 4], можно сформулировать рекомендации по применению MLP и KAN в системах технического зрения автономного водного транспорта:

ТАБЛИЦА 1. Рекомендации по применению MLP и KAN в системах технического зрения автономного водного транспорта

Подсистема	Рекомендуемая архитектура	Обоснование
Обнаружение маломерных судов	KAN с мелкой сеткой	Высокочастотные компоненты, интерпретируемость
Классификация типов судов	MLP или глубокий KAN	Сложные паттерны, требующие композиционности
Гидроакустическая обработка	KAN с адаптивной сеткой	Спектральное разложение сигналов
Оценка глобальной навигационной обстановки	MLP	Преимущественно низкочастотная информация
Интеграция разнородных сенсоров	Multi-exit KAN	Баланс точности и интерпретируемости

Проведенное исследование показывает, что сети Колмогорова-Арнольда представляют собой перспективную альтернативу классическим многослойным персептронам для задач технического зрения автономного водного транспорта. Ключевыми преимуществами KAN являются: способность эффективно обучаться на высокочастотных компонентах, что критически важно для обнаружения удаленных и малых объектов; интерпретируемость изученных функций, позволяющая верифицировать решения; адаптивность через механизм расширения сетки сплайнов; потенциально более высокая параметрическая эффективность для определенных классов функций. Вместе с тем MLP сохраняют свои позиции благодаря хорошо изученным свойствам, эффективной реализации и естественной регуляризации через спектральное смещение. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется разработка гибридных архитектур, сочетающих преимущества обоих подходов, а также адаптация механизмов multi-exit для обеспечения требуемого баланса между точностью и вычислительной эффективностью в реальном масштабе времени.

Список используемых источников

1. СПбПУ (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого). Интеллектуальная система управления КиберПилот | CyberPilot. URL: https://research.spbstu.ru/projects/cyberpilot/ (дата обращения: 26.02.2026).

2. СПбПУ (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого). Интеллектуальная система управления КиберПилот | CyberPilot. URL: https://research.spbstu.ru/projects/cyberpilot/ (дата обращения: 26.02.2026).

3. Wang Y., Siegel J. W., Liu Z., Hou T. Y. On the expressiveness and spectral bias of KANs // arXiv preprint arXiv:2410.01803. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2410.01803 (дата обращения: 26.02.2026).

4. Bagrow J., Bongard J. Multi-exit Kolmogorov–Arnold networks: enhancing accuracy and parsimony // Machine Learning: Science and Technology. 2025. Vol. 6, No. 3. Art. no. 035037. DOI: 10.1088/2632-2153/adf9bd.

5. Inno2mare Project. Publishing of the latest study of Pilot project 3: A comprehensive review of datasets and deep learning techniques for vision in unmanned surface vehicles. 2025. 3 June. URL: https://www.inno2mare.eu/2025/06/03/pilot-3-study-deep-learning-unmanned-vehicles/ (дата обращения: 26.02.2026).

STUDY OF THE PROPERTIES OF THE DEPTH DISTRIBUTION OF A MULTILAYER PERCEPTRON (MLP) AND A KOLMOGOROV-ARNOLD NEURAL NETWORK FOR APPLICATION IN INTELLIGENT VISION SYSTEMS OF AUTONOMOUS WATER TRANSPORT

Vyalshin E., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper compares the fundamental properties of depth distribution and feature representation in two key artificial neural network architectures: the multilayer perceptron (MLP) and the recently proposed Kolmogorov-Arnold network (KAN). The study focuses on the theoretical and practical aspects that determine the ability of these models to approximate complex dependencies based on their depth and structure. The paper systematically explores the differences in the concepts of depth for the two architectures and compares their potential parametric efficiency, susceptibility to vanishing gradient problems, the transparency of nested transformations, and the nature of the resulting data representations.

Key words: autonomous vessel, machine vision, multilayer perceptron, Kolmogorov-Arnold networks, spectral shift, network depth, object detection

УДК 535;53.05;62-5
ГРНТИ 29;49

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

И. В. Галактионов, О. В. Колесников, М. А. Месяцев, В. В. Топоровский

Московский технический университет связи и информатики

В работе представлены результаты экспериментального исследования алгоритмов адаптивной коррекции волнового фронта в атмосферных оптических линиях связи. Рассмотрены детерминированный алгоритм восхождения на холм и стохастический метод на основе распределения Бернулли. Показано, что применение биморфного деформируемого зеркала позволяет увеличить долю энергии, проходящей через малые апертуры, до 94 %. Проведено сравнение эффективности и скорости сходимости реализованных алгоритмов.

атмосферные оптические линии связи; адаптивная оптика; коррекция волнового фронта; деформируемое зеркало; алгоритм восхождения на холм; стохастическая оптимизация

Атмосферные оптические линии связи представляют собой перспективное направление для передачи информации на большие расстояния, включая классические и квантовые коммуникационные системы. Существенным ограничением их эффективности являются искажения волнового фронта оптического излучения, возникающие при распространении в турбулентной атмосфере [1-7]. Эти искажения приводят к расширению фокусного пятна, снижению пиковой интенсивности и, как следствие, к увеличению потерь при приеме сигнала. В связи с этим разработка и исследование алгоритмов коррекции волнового фронта с применением методов адаптивной оптики является актуальной задачей [8, 9].

В данной работе рассматриваются экспериментальные методы повышения эффективности передачи оптического излучения за счет адаптивной коррекции фазовых искажений волнового фронта. Исследование выполнено в рамках темы выпускной квалификационной работы, посвященной алгоритмам коррекции ошибок в атмосферных оптических линиях связи. В качестве исполнительного элемента использовалось биморфное деформируемое зеркало, управление которым осуществлялось на основе сигналов обратной связи от фотодиода, регистрирующего суммарную мощность излучения за апертурой [8].

Экспериментальная установка включала фокусировку лазерного пучка диаметром 45 мм через апертуры диаметром 20 и 10 мкм, что моделирует условия приема излучения в системах свободно-пространственной оптической связи. В качестве целевой функции оптимизации использовалось значение фототока, пропорциональное энергии, прошедшей через апертуру. Максимизация данного сигнала позволяла косвенно оценивать эффективность коррекции волнового фронта и степень концентрации энергии в фокусе.

Для управления деформируемым зеркалом были реализованы два различных алгоритма оптимизации. Первый алгоритм – детерминированный метод восхождения на холм (hill-climbing), направленный на последовательное увеличение плотности энергии в фокусном пятне дальней зоны. Процедура оптимизации продолжалась около 8 минут и включала 5800 шагов управления. В результате было достигнуто максимальное значение сигнала 25 823 при теоретически достижимом значении 27 472, что соответствует увеличению прошедшей через апертуру диаметром 20 мкм энергии до 94 %. Для апертуры 10 мкм эффективность составила порядка 90 %. Блок-схема алгоритма восхождения на холм представлена на рис. 1.

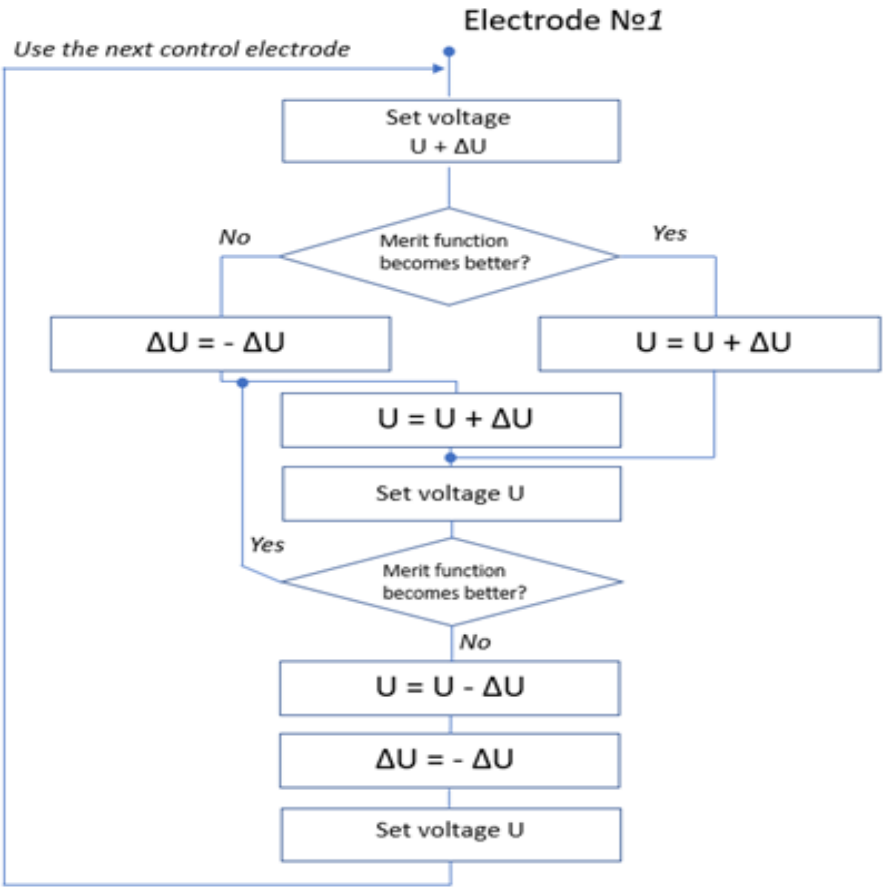


Рис. 1. Блок-схема алгоритма восхождения на холм

Второй подход основывался на стохастическом алгоритме с использованием случайных управляющих воздействий, распределенных по закону Бернулли. Данный метод обеспечивал значительно более высокую скорость сходимости: оптимизация занимала около 10 секунд и включала 500 шагов. Максимальное зарегистрированное значение сигнала составило 23 200, что соответствует передаче около 90 % энергии через апертуру 20 мкм и около 82 % – через апертуру 10 мкм.

Сравнительный анализ показал, что детерминированный алгоритм обеспечивает более высокую точность коррекции, тогда как стохастический метод обладает существенным преимуществом по скорости работы. Полученные результаты подтверждают эффективность применения алгоритмов адаптивной оптики для компенсации атмосферных искажений и могут быть использованы при разработке высокоскоростных атмосферных и квантовых оптических линий связи [10–14].

Список используемых источников

1. Lu M., Bagheri M., James A. P., Phung T. Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 29865–29884. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2841376.

2. Soloviev A., Kotov A., Perevalov S., Esyunin M., Starodubtsev M., et al. Adaptive system for wavefront correction of the PEARL laser facility // Quantum Electronics. 2020. URL: https://doi.org/10.1070/QEL17446 (дата обращения: 14.01.2026).

3. Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A. Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System // Photonics. 2023. URL: https://doi.org/10.3390/photonics10101147 (дата обращения: 14.01.2026).

4. Bertocchi G., et al. Single-photon Sagnac interferometer // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2006.

5. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti:sapphire laser beam // Quantum Electronics. 2022. URL: https://doi.org/10.1070/QEL17989 (дата обращения: 14.01.2026).

6. Hong C. K., et al. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference // Physical Review Letters. 1987. Vol. 59, No. 18. P. 2044–2046.

7. Kim Y., et al. Quantum teleportation of a polarization state with a complete Bell state measurement // Physical Review Letters. 2001.

8. Geoffrey A., Landis H. Laser beamed power – Satellite demonstration applications // Proceedings of the 43rd International Astronautical Congress, Washington, DC, USA, 1992. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19920074432 (дата обращения: 14.01.2026).

9. Vorontsov M., Weyrauch T., Carhart G. Lasers, Sources and Related Photonic Devices // OSA Technical Digest Series (CD). San Diego, USA: Optica Publishing Group, 2010. P. LSMA1. URL: https://doi.org/10.1364/LSC.2010.LSMA1 (дата обращения: 14.01.2026).

10. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. The use of modified hill climbing algorithm for laser beam focusing through the turbid medium // Proc. SPIE. 2017. URL: http://dx.doi.org/10.1117/12.2257447 (дата обращения: 14.01.2026).

11. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. Laser beam focusing through the dense multiple scattering suspension using bimorph mirror // Proc. SPIE. 2019. URL: https://doi.org/10.1117/12.2509621 (дата обращения: 14.01.2026).

12. Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Rukosuev A., Kudryashov A. LC phase modulator vs. deformable mirror for laser beam shaping: What is better? // Proc. SPIE. 2018.

13. Barros R. Experimental setup for investigation of laser beam propagation along horizontal urban path // SPIE Remote Sensing. 2014. URL: https://doi.org/10.1117/12.2324260.

14. Moll F. Free-space laser system for secure air-to-ground quantum communications // SPIE Newsroom. 2013. URL: https://spie.org (дата обращения: 14.01.2026).

ADAPTIVE WAVEFRONT CORRECTION ALGORITHMS FOR ENHANCING TRANSMISSION EFFICIENCY IN ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINKS

Galaktionov I., Kolesnikov I., Mesyatsev M., Toporovsky V.
Moscow Technical University of Communications and Informatics

The paper presents experimental results on the application of adaptive wavefront correction algorithms in atmospheric optical communication links. A deterministic hill-climbing method and a stochastic optimization algorithm based on Bernoulli-distributed control signals are investigated. The implementation of a bimorph deformable mirror made it possible to increase transmission efficiency through small apertures up to 94 %. A comparative analysis of convergence rate and correction accuracy of the considered algorithms is provided.

Key words: atmospheric optical communication, adaptive optics, wavefront correction, deformable mirror, hill-climbing algorithm, stochastic optimization

УДК 535.015
ГРНТИ 49.33.29

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОАКТЮАТОРНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕДАЧИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

И. В. Галактионов[1,2], О. В. Колесников[1], В. В. Топоровский[1]

[1]Московский технический университет связи и информатики
[2]Московский политехнический университет

В работе представлена оптимизация основных параметров пьезоактюаторного деформируемого зеркала с кольцевыми пьезопакетами для задач передачи лазерного излучения, распространяющегося в атмосферных оптических линиях связи, где преобладают эффекты турбулентности. Анализ параметров деформируемого зеркала оценивался по пространственным и динамическим характеристикам в соответствии со значением параметра Фрида и частоты Гринвуда.

атмосферные оптические линии связи, адаптивная оптика, пьезоактюаторное деформируемое зеркало

Поскольку при распространении лазерного пучка сквозь атмосферную турбулентность возникают случайные флуктуации показателя преломления, вызывающие фазовые и амплитудные искажения волнового фронта, плотность мощности излучения существенно снижается. Это приводит к расширению пространственно-угловой структуры пучка, случайным изменениям положения центра и перераспределению энергии в его поперечном сечении, что приводит к флуктуациям распределения освещенности на удаленном объекте. На данный момент использование методов и средств адаптивной оптики остается наиболее широко используемым методом подавления негативного влияния атмосферы [1-3].

Согласно Колмогоровской теории турбулентности, параметрами, описывающими турбулентную атмосферу, являются следующие: структурная постоянная показателя преломления (величина характеризующая интенсивность турбулентных пульсаций показателя преломления в атмосфере) радиус Фрида (размер неоднородностей турбулентной атмосферы, в которой среднеквадратичное отклонение волнового фронта не превышает 1 радиан), скорость ветра (скорость изменения неоднородностей турбулентного по-

тока в пространстве), которая характеризует частоту Гринвуда (диапазон частот, необходимый для коррекции адаптивной оптической системой) [4-6].

В качестве критерия коррекции фазовых искажений в адаптивной оптике принято использовать число Штреля, при малой остаточной погрешности коррекции число Штреля находится из формулы:

$$S = e^{-\sigma^2}, \quad (1)$$

где σ^2 – среднеквадратичная погрешность коррекции по апертуре (в рад^2).

Данное приближение справедливо до $\sigma = 2$ рад. Согласно критерию Марешаля считается, что система эффективно корректирует аберрации волнового фронта, если число Штреля удается увеличить до значения 0,8.

Эффективность коррекции адаптивной оптической системы может быть описана следующим образом:

$$\sigma^2 = \sigma^2_{fit} + \underbrace{\sigma^2_{temp} + \sigma^2_{meas} + \sigma^2_{delay}}_{\sigma^2_{ctrl}} + \sigma^2_{cal} \quad (2)$$

где σ_{fit} – погрешность «формы». Возникает из-за ограниченного числа степеней свободы корректора волнового фронта и, следовательно, ограниченного числа пространственных частот, которые он может исправить;

σ_{temp} – временна́я погрешность связана с ограниченной полосой управления адаптивной оптической системой;

σ^2_{meas} включает в себя все погрешности измерения (например, шум при измерении в датчике волнового фронта);

σ^2_{delay} данная погрешность возникает из-за задержек в передающих информацию интерфейсах.

Так как устройство управления с обратной связью влияет не только на временны́х, но также на погрешности, связанные с измерениями и задержкой, в уравнении (2) комбинация этих источников связана с контроллером и обозначается σ^2_{ctrl}.

σ^2_{cal} включает в себя все погрешности калибровки. Калибровка необходима для коррекции начальных аберраций оптической системы.

Поскольку большая часть суммарной погрешности расходуется на σ^2_{fit} и σ^2_{temp}, другими источниками погрешностей в дальнейшем будем пренебрегать. Для оценки погрешности «формы» может быть использована следующая формула:

$$\sigma_{fit}^2 = a\left(\frac{D_r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} N_{act}^{-\frac{5}{6}}, \quad (3)$$

где a – коэффициент формы, зависящий от типа корректора волнового фронта;

D_r – апертура принимающего телескопа (м);

r_0 – радиус Фрида (радиус когерентности) (м);

N_{act} – количество управляющих элементов корректора волнового фронта.

$$a = \begin{cases} 0.28 \text{ для пьезоактюаторного деформируемого зеркала} \\ 0.335 \text{ для биморфного деформируемого зеркала} \\ 1.26 \text{ для сегментированного зеркала} \\ \quad \text{с возможностью перемещения «вверх-вниз»} \end{cases}$$

Дисперсия временно́й погрешности может быть связана с частотой Гринвуда f_G следующим образом:

$$\sigma_{temp}^2 = m\left(\frac{f_G}{f_c}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (4)$$

где f_c – рабочая частота адаптивной оптической системы (Гц);

m – коэффициент масштабирования.

Для идеального, случая, когда контроллер полностью подавляет возмущение волнового фронта вплоть до полосы частот f_c и не влияет на более высокие частоты, коэффициент масштабирования m равен 0,191. Для более реалистичного контроллера он равен 1.

В качестве корректора волнового фронта в работе используется пьезоактюаторное деформируемое зеркало с кольцевыми пьезопакетами. Полное описание конструкции подобного зеркала может быть найдено в [7-9].

Для оптимизации параметров пьезоактюатора (длины пружины) и толщины подложки зеркала предлагается использовать такой параметр пьезопакета как блокирующая сила. Она представляет собой максимальное значение силы, генерируемое пьезопакетом, который заблокирован путем жесткого неподатливого удержания, другими словами, является максимальной развиваемой силой пакета под действием управляющего напряжения. От данного параметра линейно зависит значение максимального хода пьезопакета. Для нормальной работы актюатора необходимо, чтобы сумма сил, действующих на пьезопакет (удлинение стержня и воздействие оптической

подложки), была на 50 % меньше блокирующей силы. Соответственно, длина хода пьезопакета снизится в два раза.

Значение силы F_s, которую необходимо приложить для растяжения стержня на величину x, можно вычислить по закону Гука:

$$F_S = \xi x \tag{5}$$

где ξ – коэффициент жесткости стержня.

При этом коэффициент жесткости стержня ξ рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{E_{cm} S}{l} \tag{6}$$

где E_{cm} – модуль Юнга стали, S – площадь поперечного сечения стержня, l – длина стержня (рис. 1.).

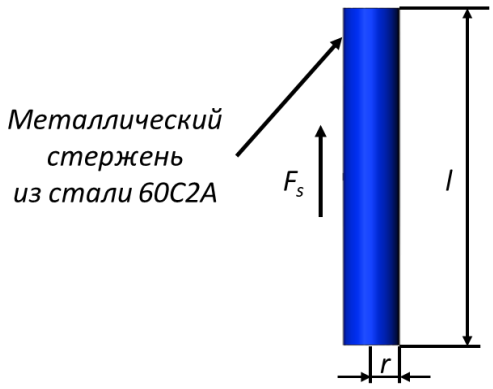


Рис. 1. Схема металлического стержня

Сила, необходимая для прогиба поверхности подложки в области каждого актюатора, вычислялась при помощи формулы:

$$F_m = \frac{4\pi}{3} \frac{E_{кр} h^3 \Delta_{\max}}{d^2 (1 - \mu^2)} \tag{7}$$

где $E_{кр}$ – модуль Юнга материала подложки, h – толщина подложки, Δ_{max} – прогиб поверхности подложки, d – расстояние между актюаторами, μ – коэффициент Пуассона. Схема для определения прогиба поверхности подложки показана на рис. 2.

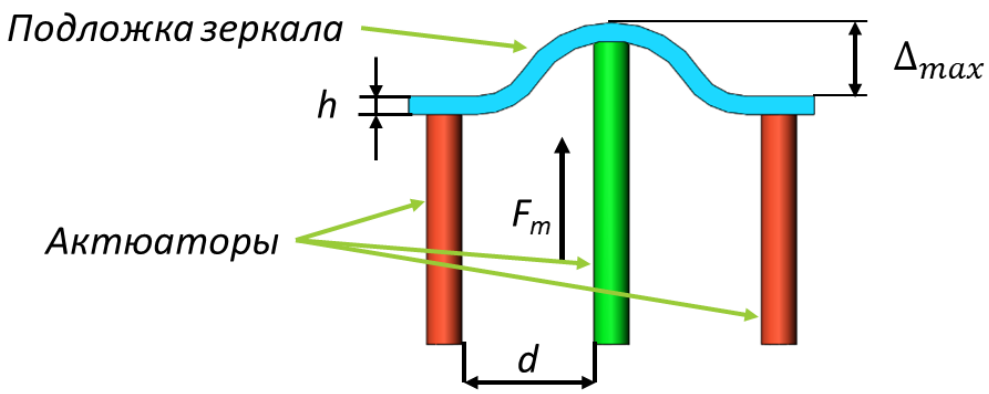


Рис. 2. Схема прогиба поверхности подложки в области каждого актюатора

Для оценки частоты первого резонанса такого деформируемого зеркала можно применить следующую формулу:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_a}{m_{a\,df}}} \quad (8)$$

где c_a – жесткость актюаторов, $m_{a\,df}$ – эффективная масса актюатора (⅓ массы подложки деформируемого зеркала в перерасчете на количество пьезоактюаторов зеркала, на которых она находится).

В данном случае рассчитать жесткость пьезоактюатора можно исходя из предположения, что она описывается фактически только жесткостью пружинного стержня.

Количество актюаторов деформируемого зеркала может быть описано формулой:

$$N_{act} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{A}{d}\right)^2 \quad (9)$$

где N_{act} – количество управляющих элементов деформируемого зеркала, A – апертура деформируемого зеркала, d – расстояние между управляющими элементами.

В статье представлена методика определения пространственных и динамических характеристик пьезоактюаторного деформируемого зеркала с кольцевыми пьезопакетами, таких как амплитуда деформации отражающей поверхности, количество актюаторов, частота первого резонанса зеркала. В качестве исходных данных используются параметры атмосферной турбулентности, такие как параметр Фрида и частота Гринвуда, которые зависят от величины структурной постоянной показателя преломления и скорости ветра соответственно.

Список используемых источников

1. Fried D.L. Anisoplanatism in adaptive optics // J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. PP. 52-61.

2. Rukosuev A., Nikitin A., Toporovsky V. et al. Real-Time Correction of a Laser Beam Wavefront Distorted by an Artificial Turbulent Heated Airflow // Photonics. 2022. V. 9. 351.

3. Galaktionov I., Sheldakova J., Samarkin V. et al. Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors // Photonics. 2023. V. 10. P. 1147.

4. Топоровский В. В., Галактионов И. В., Абдулразак С. Х. и др. Оценка эффективности компенсации искажений волнового фронта пьезоэлектрическими деформируемыми зеркалами с высоким пространственным разрешением управляющих элементов путем воспроизведения ортогональных полиномов Цернике / // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 1.

5. Топоровский В. В., Галактионов И. В., Никитин А. Н. и др. Коррекция крупно- и мелкомасштабных аберраций волнового фронта лазерного излучения в двухконтурной адаптивной оптической системе // Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 132. № 11.

6. Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V. et al. Atmospheric turbulence generator: software and hardware implementation of Kolmogorov phase screen simulation system // Proc. SPIE. 2024. V. 12871. P. 128710K.

7. Toporovsky V., Galaktionov I., Nikitin A. et al. Dual-loop adaptive optical system for compensation of the low- and high-order wavefront aberrations // Proc. SPIE. 2024. V. 13130. P. 131300I.

8. Toporovsky V., Kuzmitsky P., Galaktionov I. et al. Thermomechanical behavior of stacked-actuator deformable mirrors under incident high-power laser radiation // Proc. SPIE. 2024. V. 12871. P. 128710M.

9. Toporovsky V., Samarkin V., Sheldakova J. et al. Water-cooled stacked-actuator flexible mirror for high-power laser beam correction // Optics & Laser Technology. 2021. V. 144. PP. 107427.

PARAMETERS OPTIMIZAITON OF THE STACKED-ACTUATOR DEFORMABLE MIRROR FOR LASER FREE-SPACE COMMUNICATIONS

Galaktionov I.[1,2] Kolesnikov O.[1,] Toporovsky V.[1]
[1]Moscow Technical University of Communications and Informatics
[2]Moscow Polytechnic University

This paper presents the optimization of the key parameters of a piezoelectric deformable mirror with annular piezoelectric packs for the transmission of laser radiation propagating in atmospheric optical communication lines, where turbulence effects predominate. The deformable mirror's parameters were analyzed using spatial and dynamic characteristics based on the Fried parameter and Greenwood frequency.

Key words: free-space optical communications, adaptive optics, stacked-actuator deformable mirror

УДК 004.7
ГРНТИ 47.29.31

КАК РАБОТАЕТ LI-FI: ПРИНЦИПЫ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ГИГАБИТНЫХ ДАННЫХ

И. В. Галактионов, О. В. Колесников, В. В. Топоровский, А. А. Шарафисламов

Московский технический университет связи и информатики

В статье рассматривается технология беспроводной передачи данных с использованием видимого светового излучения. Раскрываются физические основы функционирования системы, основанные на сверхбыстрой модуляции светового потока светодиодных источников. Описываются процессы преобразования оптического сигнала в электрический с применением фотодиодов и цифровой обработки. Анализируются методы модуляции, обеспечивающие высокую спектральную эффективность и возможность достижения гигабитных скоростей передачи информации. Рассматриваются преимущества технологии, включая широкую полосу частот, локализованный характер распространения сигнала и снижение радиочастотных помех. Отдельное внимание уделяется ограничениям, связанным с особенностями оптического канала, и перспективам внедрения технологии в телекоммуникационные и инфраструктурные системы.

беспроводная связь, видимый свет, светодиод, фотодиод, модуляция сигнала, оптический канал передачи данных

Современные беспроводные системы связи испытывают растущую нагрузку, обусловленную увеличением числа подключенных устройств и объема передаваемой информации. Использование радиочастотного диапазона сопровождается ограниченной полосой частот, интерференцией и необходимостью регулирования спектра. В качестве альтернативного направления развития рассматривается использование оптического диапазона видимого света [1-10].

Технология Li-Fi основана на передаче данных посредством модуляции интенсивности светового излучения светодиодов. В отличие от радиочастотных систем, передача осуществляется в оптическом диапазоне, обладающем существенно большей полосой частот. Это позволяет формировать каналы передачи с высокой пропускной способностью.

Принцип функционирования системы

Передача информации реализуется путем изменения интенсивности светового потока источника излучения. Светодиод способен изменять яркость с частотой порядка сотен мегагерц, что превышает порог восприятия

человеческого зрения. Передаваемый цифровой сигнал s(t) управляет током через светодиод, формируя световой поток Φ(t).

Приемная часть системы включает фотодиод, преобразующий оптическое излучение в электрический ток i(t). Линейная модель канала может быть представлена выражением:

$$i(t) = R\Phi(t)+n(t), \quad (1)$$

где R – чувствительность фотоприемника, Φ(t) – мгновенное значение светового потока, n(t) – аддитивная шумовая составляющая канала [11].

Максимальная пропускная способность канала определяется формулой Шеннона:

$$C = B\log2(1+NS), \quad (2)$$

где B – полоса пропускания канала, S/NS/N – отношение сигнал/шум [12].

Как следует из формулы (2), увеличение полосы частот B в оптическом диапазоне позволяет достигать гигабитных скоростей передачи данных.

Методы модуляции и спектральная эффективность

Простейшим способом передачи является двоичная модуляция включения и выключения излучения. Однако для повышения скорости передачи используются более сложные методы, включая ортогональное частотное мультиплексирование и квадратурную амплитудную модуляцию [12].

Многонесущие методы позволяют распределять данные по нескольким поднесущим частотам, что повышает устойчивость к шумам и интерференции. Спектральная эффективность определяется числом передаваемых бит на единицу полосы частот и существенно возрастает при использовании многоуровневых схем модуляции.

Ограничения технологии

Несмотря на преимущества, технология имеет ряд ограничений. Передача требует прямой или отраженной видимости между передатчиком и приемником. Перекрытие светового потока может привести к потере сигнала. Существенное влияние оказывает внешнее освещение, увеличивающее шумовую составляющую n(t) в формуле (1).

Кроме того, требуется разработка механизмов переключения между световыми точками доступа при перемещении пользователя внутри помещения.

Таблица 1. Основные характеристики световой и радиочастотной передачи.

Параметр	Передача на основе видимого света	Радиочастотная передача
Полоса частот	Очень широкая	Ограниченная
Проникновение через стены	Отсутствует	Присутствует
Уровень помех	Низкий	Возможно, интерференция
Пространственная локализация	Высокая	Низкая

Как следует из таблицы, световая передача обладает высокой пространственной локализацией сигнала, что повышает физическую защищенность канала. Отсутствие радиочастотного излучения делает технологию перспективной для применения в медицинских учреждениях и на транспорте [13, 14].

Перспективы применения

Перспективными направлениями внедрения являются интеллектуальные здания, системы автоматизации, транспортная инфраструктура и производственные объекты с повышенными требованиями к электромагнитной совместимости. Интеграция функций освещения и передачи данных позволяет формировать гибридные сети, сочетающие оптические и радиочастотные каналы.

Дальнейшее развитие технологии связано с совершенствованием светодиодных источников, повышением чувствительности фотоприемников и оптимизацией алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Заключение

Технология передачи данных посредством видимого светового излучения представляет собой перспективное направление развития беспроводной связи. Использование сверхбыстрой модуляции светодиодов и широкой полосы оптического спектра обеспечивает возможность формирования высокоскоростных каналов передачи информации. Проведенный анализ показывает, что при дальнейшем совершенствовании элементной базы и алгорит-

мов обработки сигналов технология может стать важным компонентом гибридных телекоммуникационных систем будущего.

Список используемых источников

1. Haas H. Wireless data from every light bulb // TED Global, 2011.

2. Barros R. Experimental setup for investigation of laser beam propagation along horizontal urban path // SPIE Remote Sensing, 2014. Vol. 9242, 92421L.

3. Lu M, Bagheri M, James AP, Phung T. Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension // IEEE Access 2018; 6: 29865–29884. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2841376.

4. Geoffrey A, Landis H. Laser beamed power – Satellite demonstration applications. Proceedings of the 43rd International Astronautical Congress 1992, Washington, DC, USA. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19920074432 (дата обращения: 22.02.2026).

5. Vorontsov M, Weyrauch T, Carhart G. Lasers, Sources and Related Photonic Devices // OSA Technical Digest Series (CD), San Diego, USA: Optica Publishing Group Publisher; 2010; p. LSMA1. URL: https://doi.org/10.1364/LSC.2010.LSMA1 (дата обращения: 22.02.2026).

6. Soloviev A., Kotov A., Perevalov S., Esyunin M., Starodubtsev M., et al. Adaptive system for wavefront correction of the PEARL laser facility // Quantum Electronics, 50(12), 1115-1122, 2020 URL: https://doi.org/10.1070/QEL17446 (дата обращения: 19.01.2026).

7. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. The use of modified hill-climbing algorithm for laser beam focusing through the turbid medium // Proc. SPIE, 10090, 100901K, 2017. URL: http://dx.doi.org/10.1117/12.2257447 (дата обращения: 13.01.2026).

8. Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A. Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors // Photonics, 10(10), 1147, 2023. URL: https://doi.org/10.3390/photonics10101147 (дата обращения: 22.01.2026).

9. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti: sapphire laser beam // Quantum Electronics, 52(2), 187-194, 2022. URL: https://doi.org/10.1070/QEL17989 (дата обращения: 19.01.2026).

10. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. Laser beam focusing through the dense multiple scattering suspension using bimorph mirror // Proc. SPIE, 10886, 1088619, 2019. URL: https://doi.org/10.1117/12.2509621 (дата обращения: 19.01.2026).

11. Komine T., Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights // IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004. Vol. 50.

12. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal, 1948. Vol. 27.

13. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling. CRC Press, 2012.

14. Pathak P.H., Feng X., Hu P., Mohapatra P. Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015. Vol. 17.

HOW LI-FI WORKS: PRINCIPLES OF OPTICAL TRANSMISSION OF GIGABIT DATA

Galaktionov I., Kolesnikov O., Toporovsky V., Sharafislamov A.
Moscow Technical University of Communications and Informatics

The physical principles of system operation are explained, including ultra-fast modulation of the light flux produced by light-emitting diode sources. The processes of converting optical signals into electrical ones using photodiodes and digital signal processing are described. Modulation methods providing high spectral efficiency and enabling gigabit data transmission rates are analyzed. The advantages of the technology are discussed, including wide bandwidth, spatial localization of signal propagation, and reduced radio-frequency interference. Particular attention is given to the limitations associated with the characteristics of the optical channel and to the prospects for implementation in telecommunication and infrastructure systems.

Key words: wireless communication, visible light, light-emitting diode, photodiode, signal modulation, optical data transmission channel

УДК 004.738.5:519.876:621.391
ГРНТИ 20.53.19;20.23.29

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И АДАПТИВНОСТИ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ В ГОРОДСКИХ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

М. К. Гелдимырадова, И. Розыев

Институт Телекоммуникации и информатики Туркменистана

В статье рассматриваются вопросы устойчивости и адаптивности математической модели управления трафиком в городских мультисервисных сетях связи. Проанализированы условия устойчивого функционирования сети при изменении параметров нагрузки и топологии. Исследованы адаптивные свойства модели, обеспечивающие сохранение требуемых показателей качества обслуживания в условиях нестационарного трафика. Показано, что применение адаптивных механизмов управления позволяет повысить устойчивость сети к перегрузкам и отказам элементов инфраструктуры.

устойчивость сети, адаптивность, управление трафиком, мультисервисные сети, качества обслуживания, динамическая оптимизация

Современные городские мультисервисные сети связи функционируют в условиях высокой динамики трафика, обусловленный ростом числа пользователей, разнообразием предоставляемых услуг и изменяющимися требованиями к качеству обслуживания. В этих условиях особую значимость приобретают свойства **устойчивости адаптивности** моделей управления трафиком, определяющие способность сети сохранять работоспособность и требуемые характеристики при внешних и внутренних воздействиях [1-4].

Анализ устойчивости позволяет оценить поведение сети при перегрузках, отказах каналов и резких изменениях интенсивности потоков, а адаптивность определяет способность модели корректировать параметры управления в реальном времени.

1. Понятие устойчивости модели управления трафиком

1.1. Определение устойчивости

Под устойчивостью модели управления трафиком понимается способность сети сохранять допустимые значения показателей качества обслуживания при возмущениях, таких как:

– изменение интенсивности входных потоков;
– перераспределение нагрузки между узлами;

– отказ элементов сети.

Математически устойчивость может быть охарактеризована ограниченностью выходных параметров при ограниченных входных воздействиях.

1.2. Критерии устойчивости

Основными критериями устойчивости модели являются:

– ограниченность средней задержки передачи пакетов;
– отсутствие неограниченного роста очередей;
– сохранение пропускной способности в допустимых пределах;
– устойчивость маршрутов к колебаниям нагрузки.

Если при заданных ограничениях на входной трафик выполняется указанные условия, модель считается устойчивой.

2. Анализ устойчивости математической модели

2.1. Устойчивость по загрузке каналов

Рассмотрим сеть в виде ориентированного графа, где каждому каналу соответствует пропускная способность C_{ij}.

Условие устойчивости по загрузке может быть записано как:

$$\lambda_{ij} < C_{ij}\ , \forall (i,j), \qquad (1)$$

где λ_{ij} – интенсивность трафика на канале.

Нарушение данного условия приводит к росту очередей и деградации качества обслуживания.

2.2. Устойчивость очередей обслуживания

Для узлов сети, описываемых моделями массового обслуживания, устойчивость достигается при выполнении условия:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1\ , \qquad (2)$$

где λ – интенсивность поступления пакетов, μ – интенсивность обслуживания.

Данное условие является фундаментальным для предотвращения перегрузок и потери пакетов.

3. Адаптивность модели управления трафиком

3.1. Понятие адаптивности

Адаптивность модели заключается в способности автоматически изменять параметры управления (маршруты, приоритеты, распределение ресурсов) в ответ на изменение состояния сети.

Адаптивная модель использует информацию о текущей нагрузке и прогнозируемых изменениях трафика.

3.2. Механизмы адаптации

К основным механизмам адаптации относятся:

– динамическая маршрутизация;
– перераспределение пропускной способности;
– регулирование приоритетов потоков;
– прогнозирование трафика на основе статистических данных.

Эти механизмы позволяют снизить влияние кратковременных перегрузок и повысить стабильность работы сети.

4. Совместный анализ устойчивости и адаптивности

Устойчивость и адаптивность являются взаимосвязанными свойствами.

Адаптивные механизмы повышает устойчивость сети за счет:

– предотвращения локальных перегрузок;
– равномерного распределения нагрузки;
– быстрого восстановления после отказов.

В то же время избыточная адаптивность может привести к колебаниям параметров управления, что требует введения ограничений на скорость изменения управляющих воздействий.

5. Результаты анализа

Проведенный анализ показывает, что:

– неадаптивные модели обладают ограниченной устойчивостью в условиях нестационарного трафика;
– адаптивные модели обеспечивают устойчивое функционирование сети при широком диапазоне нагрузок;
– наилучшие результаты достигаются при использовании гибридных моделей, сочетающих аналитические условия устойчивости и адаптивные алгоритмы управления.

В статье выполнен анализ устойчивости и адаптивности модели управления трафиком в городских мультисервисных сетях связи. Показано, что устойчивость является необходимым условием надежного функционирования сети, а адаптивность – ключевым фактором обеспечения качества обслуживания в условиях динамической нагрузки. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения адаптивных моделей управления трафиком при проектировании и эксплуатации современных телекоммуникационных сетей.

Список используемых источников

1. Kleinrock L. Queueing Systems. Volume 1: Theory. New York: Wiley-Interscience, 1975. 417 p.

2. Stallings W. Foundations of Modern Networking. Addison-Wesley Professional, 2015. 560 p.

3. Park, K., & Willinger, W. (Eds.). (2000). Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. Wiley. ISBN: 978-0-471-31974-0.

4. Traffic Engineering and QoS // Cisco Systems. 2021. URL: cisco.com (дата обращения: 17.04.2024).

ANALYSIS OF THE STABILITY AND ADAPTABILITY OF THE TRAFFIC MANAGEMENT MODEL IN URBAN MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORKS

Geldimyradova M., Rozyew I.
Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan

This article examines the stability and adaptability of a mathematical model for traffic management in urban multiservice communication networks. The conditions for stable network operation under changing load and topology parameters are analyzed. The adaptive properties of the model, which ensure the maintenance of required quality of service indicators under non-stationary traffic conditions, are investigated. It is shown that the use of adaptive control mechanisms can improve network resilience to overloads and infrastructure failures.

Key words: network stability, adaptability, traffic management, multiservice networks, quality of service, dynamic optimization

УДК 621.39, 530.182
ГРНТИ 49.44.31

ПОДДЕРЖАНИЕ КВАЗИСОЛИТОННОГО РЕЖИМА В ВОСС С ЧЕРЕДОВАНИЕМ УЧАСТКОВ НОРМАЛЬНОЙ И АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ ПРИ РАМАНОВСКОМ УСИЛЕНИИ

С. Ф. Глаголев, С. Э. Доценко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследуются условия поддержания квазисолитонного режима распространения оптических импульсов в волоконно-оптических системах связи с чередованием участков оптического волокна с нормальной и аномальной хроматической дисперсией при наличии затухания и распределенного рамановского усиления. Анализ проводится на основе нелинейного уравнения Шредингера с учетом дисперсии, нелинейности и непрерывного профиля усиления. Показано, что распределенное рамановское усиление обеспечивает более равномерный энергетический профиль вдоль линии передачи и существенно расширяет область параметров, при которых сохраняется баланс между хроматической дисперсией и фазовой самомодуляцией. Дополнительно исследовано влияние управляемого начального чирпинга, формируемого дополнительными волоконными сегментами. Результаты численного моделирования демонстрируют рост устойчивости квазисолитонного режима, увеличение допустимых длин секций и значительное повышение Q-фактора по сравнению с системами, использующими дискретные оптические усилители.

волоконно-оптическая система связи, квазисолитон, распределенное рамановское усиление, чередование дисперсии, нелинейное уравнение Шредингера, фазовая самомодуляция

Данная статья продолжает цикл исследований передачи оптических импульсов в солитонном и квазисолитонном режимах [1, 2], который является одним из эффективных подходов к обеспечению высокой дальности и устойчивости волоконно-оптических систем связи (ВОСС). Классический солитон реализуется при строгом балансе между хроматической дисперсией (ХД) и нелинейностью оптического волокна (ОВ), однако в реальных ВОСС данный баланс нарушается из-за наличия затухания и неоднородностей параметров ОВ. В этой связи практический интерес представляет квазисолитонный режим, при котором форма импульса сохраняется на протяженных расстояниях несмотря на периодические отклонения дисперсионных и не-

линейных характеристик. Одним из эффективных методов управления дисперсионно-нелинейным балансом является использование волоконно-оптических линейных трактов (ВОЛТ) с чередованием участков нормальной и аномальной ХД [1]. Дополнительное повышение устойчивости достигается за счет применения распределенного усиления на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) – рамановского усиления, обеспечивающего плавную компенсацию потерь вдоль ВОЛТ и снижение усилительного шума [3, 4]. Целью данной работы является исследование условий поддержания квазисолитонного режима в ВОСС с чередованием дисперсии при ВКР, а также анализ влияния начального чирпинга импульсов на устойчивость передачи.

Распространение оптических импульсов в ОВ описывается нелинейным уравнением Шредингера (НУШ), которое в безразмерной форме для ОВ без потерь имеет вид [5, 6]:

$$i\frac{\partial u}{\partial Z}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}+|u|^2u=0, \quad (1)$$

где $u(Z,\tau)$ – нормированная комплексная огибающая оптического поля, $Z = z/L_D$ – нормированное расстояние, $\tau = t/T_0$ – нормированное время, $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ – дисперсионная длина, км, $T_0=t_u/1.763$ – полуширина секансного импульса, пс, t_u – исходная длительность импульса, пс, β_2 – коэффициент дисперсии групповых скоростей (ДГС), пс^2/км. Равенство дисперсионной и нелинейной длин $L_D = L_{NL}$, где $L_{NL} = 1/(\gamma P_m)$, определяет режим фундаментального солитона. Пиковая мощность импульса в мВт согласно (1) выражается соотношением [5]:

$$P_{m\Phi}=\frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2},$$

где γ – коэффициент нелинейности ОВ, Вт$^{-1}$·км$^{-1}$. Рассматривается ВОСС, состоящая из последовательно соединенных участков ОВ с нормальной $\beta_{2n} > 0$ и аномальной $\beta_{2a} < 0$ ДГС. Для периода чередования длиной l_n+l_a вводится усредненный остаточный параметр ДГС:

$$\Delta\beta_2=\frac{\beta_{2n}\cdot l_n+\beta_{2a}\cdot l_a}{l_n+l_a}. \quad (2)$$

При малом отрицательном значении $\Delta\beta_2$, определенном по формуле (2), формируется квазисолитонный режим. Требуемая входная пиковая мощность для компенсации остаточной ДГС:

$$P_{0m} = \frac{|\Delta\beta_2|}{\gamma T_0^2}. \quad (3)$$

С учетом потерь и ВКР распространение импульсов описывается модифицированным НУШ:

$$i\frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = -\frac{i}{2}L_D[\alpha - g(z)]u, \quad (4)$$

где α – коэффициент затухания ОВ, Нп/км, $g(z)$ – коэффициент усиления. Коэффициент усиления без учета истощения накачки при двунаправленной накачке описывается выражением [3]:

$$g(z) = g_1 \cdot exp(-\alpha_p z) + g_2\, exp[-\alpha_p(L - z)],$$

где g_1 и g_2 – коэффициенты, пропорциональные мощностям прямой и встречной накачки соответственно, α_p – коэффициент затухания в ОВ на длине волны накачки, Нп/км, L – длина усилительного участка (УУ), км. Для разделения быстро меняющегося энергетического профиля и медленной эволюции формы импульса используется представление:

$$u(Z, \tau) = \sqrt{p(Z)} \cdot v(Z, \tau), \quad (5)$$

где функция $p(Z)$ описывает относительное изменение пиковой мощности вдоль ВОЛТ. Подстанив (5) в (4) получим дифференциальное уравнение изменение мощности:

$$\frac{dp}{dZ} = [g(Z) - \alpha]L_D p,$$

что приводит к усредненному НУШ:

$$i\frac{\partial v}{\partial Z} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + p(Z)|v|^2 v = 0.$$

Для анализа квазисолитонного режима вводится среднее значение относительной пиковой мощности на УУ:

$$\bar{p} = \frac{1}{L}\int_0^L p\,(z)dz,$$

где профиль $p(z)$ *для* двунаправленной накачки:

$$p(z) = exp\left\{\alpha \cdot L \cdot \left[\frac{sh[\alpha_p \cdot (z - L/2)] + sh(\alpha_p \cdot L/2)}{2 \cdot sh(\alpha_p \cdot L/2)}\right] - \alpha \cdot z\right\}.$$

Требуемая пиковая мощность на входе УУ определяется соотношением [4]:

$$P_{0m} = \frac{P_{m\Phi}}{\bar{p}} = KP_{m\phi}, \quad K = \frac{1}{\bar{p}}$$

где P_{0m} – мощность, определенная в (3). Коэффициент K характеризует влияние профиля усиления на энергетический баланс импульса и является универсальным параметром как для систем с дискретными оптическими усилителями, так и для систем с распределенным рамановским усилением. Для моделирования двунаправленного распределенного рамановского усиления каждая секция линии представляется в виде эквивалентной подсистемы с собственной встречной накачкой, что обеспечивает корректное воспроизведение суммарного профиля усиления вдоль линии и устойчивость численного решения при моделировании протяженных трасс. Параметры ВОСС и используемые характеристики ОВ соответствуют схеме моделирования, приведенной на рис. 6 в работе [1].

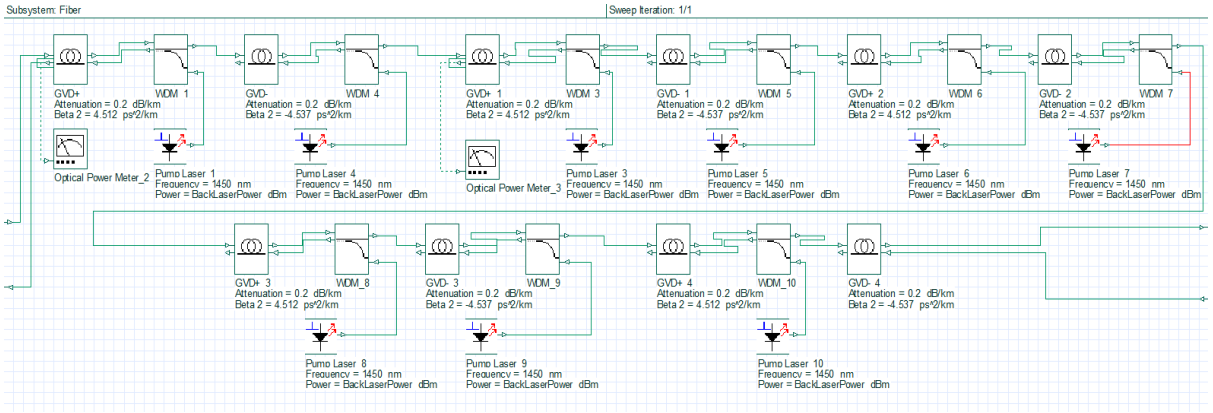


Рис. 1. Эквивалентная подсистема моделирования волоконно-оптической системы связи с распределенным рамановским усилением и чередованием участков нормальной и аномальной хроматической дисперсии

Результаты моделирования показывают, что применение ВКР существенно расширяет область параметров, при которых сохраняется квазисолитонный режим. При остаточной дисперсии Δβ2 в диапазоне от -0.2 до -0.4 пс²/км форма импульса сохраняется при длинах участков нормальной дисперсии до 15 км. Отклонение выходной пиковой мощности от входной не превышает 5–7 %, а длительность импульса остается близкой к 20 пс при суммарной длине линии свыше 1000 км (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты моделирования квазисолитонной ВОСС с использованием ОВ с потерями без начального чирпинга и распределенного рамановского усиления

N, п/п	$\Delta\beta_2$	l_n, км	l_a, км	Кол-во секций на УУ	Длина УУ, L_N, км	Кол-во УУ N	Длина общая, L, км	Мощность накачки, P_p, дБм	Результаты расчета		Результаты моделирования		
									K	Вх. пик. мощн. P_{0m}, мВт	Вых. пик. мощн. P_{lm}, мВт	Длит. вых. имп. t_{ul}, пс	Q
1	-0.2	5	5.43	10	104.3	10	1043	14.75	0.922	0.9	0.9	20.1	57
2	-0.2	10	10.87	5	104.3	10	1043	15.16	0.922	0.9	1.0	20.2	56
3	-0.2	15	16.30	4	125.2	10	1252	15.71	0.839	0.8	1.1	20.2	62
4	-0.3	5	5.68	10	106.8	10	1068	14.71	0.914	1.3	1.3	20.3	72
5	-0.3	10	11.36	5	106.8	10	1068	15.20	0.914	1.3	1.4	20.4	59
6	-0.3	15	17.04	4	128.1	10	1281	15.76	0.825	1.2	1.6	20.3	68
7	-0.4	5	5.94	10	109.4	10	1094	14.80	0.905	1.8	1.8	20.3	68
8	-0.4	10	11.84	5	109.4	10	1140	15.23	0.905	1.8	1.9	20.2	76
9	-0.4	15	17.81	4	131.2	10	1312	15.81	0.809	1.6	2.2	20.0	73
10	-0.6	10	12.99	5	114.9	10	1149	15.33	0.884	2.6	2.8	20.5	83

Введение управляемого начального чирпинга дополнительно повышает устойчивость режима передачи. Для всех исследованных значений Δβ2 вплоть до -0.6 пс²/км форма импульса сохраняется без существенного уширения, а значения Q-фактора достигают 90. Полученные результаты (табл. 2) свидетельствуют о снижении влияния нелинейных и дисперсионных искажений за счет предварительного формирования фазового профиля импульса.

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования квазисолитонной ВОСС с использованием ОМ ОВ с потерями и начальным чирпингом и распределенного рамановского усиления

N, п/п	$\Delta\beta_2$	l_n, км	l_a, км	Кол-во секций в пролете	Длина УУ, L_N, км	Кол-во пролетов N	Длина общая, L, км	Мощность накачки, P_p, дБм	Результаты расчета		Результаты моделирования		
									K	Вх. пик. мощн. P_m, мВт	Вых. пик. мощн. P_{lm}, мВт	Длит. вых. имп. t_{ul}, пс	Q
1	-0.2	5	5.43	10	109.5	10	1095	14.81	0.905	0.9	0.9	20.0	54
2	-0.2	10	10.87	5	114.8	10	1147	15.26	0.885	0.9	0.9	19.8	49
3	-0.2	15	16.30	4	140.8	10	1406	15.82	0.758	0.7	1.0	20.0	46
4	-0.3	5	5.68	10	112.1	10	1121	14.82	0.895	1.3	1.2	20.0	70
5	-0.3	10	11.36	5	117.5	10	1175	15.30	0.874	1.3	1.3	19.9	70
6	-0.3	15	17.04	4	144.2	10	1442	15.85	0.738	1.1	1.3	19.9	70
7	-0.4	5	5.94	10	114.8	10	1148	14.86	0.885	1.7	1.7	20.1	72
8	-0.4	10	11.84	5	120.1	10	1119	15.33	0.862	1.7	1.6	20.0	77
9	-0.4	15	17.81	4	147.6	10	1477	15.90	0.719	1.4	1.6	20.0	60
10	-0.6	10	12.99	5	126.4	10	1264	15.41	0.833	2.4	2.4	20.2	90

Проведенное исследование показало, что распределенное рамановское усиление является эффективным средством поддержания квазисолитонного режима в ВОСС с чередованием участков нормальной и аномальной дисперсии. По сравнению с дискретными усилителями достигается более равномерный энергетический профиль снижение чувствительности к параметрам линии и существенный рост показателей качества передачи [1]. Сочетание распределенного усиления с управляемым начальным чирпингом обеспечивает максимальный запас устойчивости и позволяет реализовать протяженные ВОСС с сохранением формы импульсов на расстояниях свыше 1300 км.

Список используемых источников

1. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Доценко С. Э. Анализ методов управления дисперсией для поддержания квазисолитоного режима распространения импульсов в высокоскоростной волоконно-оптической системе связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 16–26. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-16-26. EDN:KIGLSY

2. Глаголев С. Ф. Доценко С. Э. Квазисолитонный режим в многопролетной волоконнооптической системе связи с применением оптических усилителей // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 47–56. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-47-56

3. Глаголев С. Ф. Использование ВКР усилителей для поддержания квазисолитонного режима в одномодовых волокнах со смещенной дисперсией / С. Ф. Глаголев, В. С. Горсков, С. Э. Доценко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 234-240. EDN: WFCKXC.

4. Глаголев С. Ф. Поддержание квазисолитонного режима в ВОСС с использованием усилителей Рамана / С. Ф. Глаголев, С. Э. Доценко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, Санкт-Петербург, 15–16 февраля 2022 года. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2022. С. 343-348. EDN: KVGYLR.

5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ.- М.: Мир, 1996. 323 с.

6. Глаголев С. Ф. Использование оптических усилителей EDFA для поддержания квазисолитонного режима распространения сигналов по одномодовым волокнам со смещенной дисперсией / С. Ф. Глаголев, В. С. Горсков, С. Э. Доценко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 228-234. EDN: ZQYRZZ.

SUPPORT OF THE QUASISOLITON MODE IN FOSS WITH INTERLEAVING OF NORMAL AND ANOMALOUS DISPERSION SECTIONS AND DISTRIBUTED RAMAN AMPLIFICATION

Glagolev S., Dotsenko S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper studies the conditions for maintaining the quasisolitonic mode of propagation of optical pulses in fiber-optic communication systems with interleaving of optical fiber sections with normal and anomalous chromatic dispersion in the presence of attenuation and distributed Raman amplification. The analysis is based on the nonlinear Schrödinger equation, taking into account dispersion, nonlinearity, and a continuous amplification profile. It is shown that distributed Raman amplification provides a more uniform energy profile along the transmission line and significantly expands the range of parameters that maintain a balance between chromatic dispersion and phase self-modulation. Additionally, the influence of controlled initial chirping generated by additional fiber segments is investigated. The results of numerical simulations demonstrate an increase in the stability of the quasisolitonic mode, an increase in the permissible section lengths, and a significant increase in the Q-factor compared to systems using discrete optical amplifiers.

Key words: fiber-optic communication system, quasisoliton, distributed Raman amplification, dispersion interleaving, nonlinear Schrödinger equation, phase self-modulation

УДК 621.396.4
ГРНТИ 50.37.03

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА К ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Ю. Н. Голубев, И. Б. Паращук, А. В. Селезнев

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены некоторые важные аспекты анализа и синтеза требований, предъявляемых системами искусственного интеллекта к инфраструктуре современных и перспективных центров обработки данных, изучены вопросы, позволяющие установить, как изменятся не только сами эти требования, но и весь механизм их формирования для дата-центров с интеллектуальным кластером. Проведен анализ некоторых зарубежных и отечественных стандартов, предложены стадии общей процедуры, методологически обеспечивающей и обуславливающей процесс формирования требований, предъявляемых системами с искусственным интеллектом к инфокоммуникационной составляющей центров обработки данных такого класса.

инфокоммуникационная инфраструктура, центр обработки данных, искусственный интеллект, требование, производительность, графический процессор

Не секрет, что одной из технологических основ существования и развития IT-инфраструктуры и в целом – информационного пространства страны, выступают современные (и перспективные) центры обработки данных (ЦОД). Эти объекты составляют программно-технический фундамент не только критической информационной инфраструктуры России, но и базу для цифровой трансформации всех сфер жизнедеятельности нашего государства, ключевой инструмент для работы над важнейшей проблемой современного информационного века – проблемой поиска, хранения и обработки Больших Данных [1, 2].

Центры обработки данных завоевали признание на фоне эволюционных тенденций цифровой трансформации, как некие «огромные компьютерные залы», как специализированные объекты, позволяющие работать с Большими Данными, как конгломерат информационно-телекоммуникационного оборудования (множество серверов и сетевое оборудование) и инженерной инфраструктуры [3-5].

Современные и перспективные ЦОД берут на себя функции предоставления информационных услуг путем эффективной (и относительно недорогой) реализации процедур хранения, обработки и распространения информации, чаще всего, в интересах корпоративных пользователей.

Реализуемое в ЦОД эффективное использование программно-аппаратных средств и комплексов, основанное на фундированной (совокупной, консолидированной) эксплуатации вычислительных ресурсов и средств хранения информации, а также на рациональном распределении и перераспределении нагрузки на серверы, структурированную кабельную систему и иные средства телекоммуникаций, обеспечивает безусловную востребованность объектов такого класса [6, 7].

В рамках эволюции инфокоммуникаций особого внимания в современных условиях удостоены относительно новые, инновационные подходы к построению перспективных ЦОД, ориентированные на создание, так называемых, программно-определяемых дата-центров. Это ЦОД, лежащие в основе облачных технологий, в них вся инфраструктура – программная (виртуальная) и управление ею осуществляется не вручную на уровне отдельных физических компонентов и подсистем, а только с помощью программного обеспечения и средств автоматизации. Иными словами, программно-определяемые ЦОД — это современные и перспективные эффективные дата-центры, все программно-аппаратные компоненты которых, предназначенные для сбора и обработки больших объемов информации, все базовые элементы (вычислительные ресурсы, хранилища данных и сетевые технологии) – абстрагированы, виртуальны и предоставляются пользователям, как программные сервисы [8-10].

Инфокоммуникационная инфраструктура современных ЦОД, в целом, до недавнего времени удовлетворяла потребностям пользователей, позволяла решать почти все задачи информационного обеспечения их запросов.

Рубежом, условным водоразделом, подчеркнувшим и обусловившим объективную необходимость усовершенствования ЦОД, положившим начало исследованиям, нацеленным на создание еще более эффективных дата-центров, послужило появление на «мировой технологической арене» систем искусственного интеллекта (ИИ). Достоинства и незаурядные технологические возможности систем ИИ завоевали им признание в различных сферах жизнедеятельности общества и государства, включая сферу информационного обеспечения, но, как это часто бывает, построение и использование таких систем потребовало дополнительной «платы», особых усилий и затрат, затрагивающих и ЦОД, как объекты, предназначенные для хранения, обучения и обработки моделей и структурированных наборов данных

(датасетов), которые используется для обучения и тестирования, например, алгоритмов машинного обучения, проведения анализа и решения конкретных задач с использованием ИИ.

В этой связи, яркую и безусловную актуальность, на наш взгляд, приобретает задача исследования, формулировки и формирования требований, предъявляемых системами ИИ к инфокоммуникационной инфраструктуре современных и перспективных центров обработки данных. Необходимо установить, как изменятся не только сами требования к инфокоммуникационной инфраструктуре ЦОД, но и весь механизм (методика) формирования требований к современному и перспективному дата-центру. Существуют зарубежные и отечественные стандарты, например, актуальная редакция Международного стандарта ANSI/TIA-942-C (2024), уже пытающиеся учесть новые технологии, такие как ИИ и виртуальная реальность, но конкретные требования для ЦОД, ориентированных на ИИ, пока не сформулированы [11, 12].

Вместе с тем системы ИИ требуют иных, зачастую нетривиальных подходов при их «включении» в технологическую сферу и процедурную среду функционирования IT-инфраструктур, дата-центров либо иной техники для инфокоммуникационных сетей и систем [13-15].

С точки зрения основных этапов формирования требований, предъявляемых системами ИИ к инфраструктуре современных и перспективных ЦОД, на наш взгляд, необходимо рассмотреть несколько стадий, обеспечивающих и реализующих данный процесс:

I. Стадия уточнения целей и аффилиации пользователей с учетом потребностей систем ИИ, размещенных и работающих на инфокоммуникационных ресурсах (платформе) современных и перспективных ЦОД. При этом необходимо оценить не только объем и номенклатуру (определить диапазон) сервисов, предоставляемых этими системами ИИ на базе ЦОД, но и, как следствие, требуемый уровень катастрофоустойчивости дата-центра такого класса с учетом устойчивости к отказам и сбоям систем искусственного интеллекта [13, 14].

II. Стадия формирования (выбора) требуемого уровня надежности ЦОД с учетом надежности систем ИИ, размещаемых и функционирующих на инфокоммуникационных ресурсах (платформе) подобных современных и перспективных дата-центров. Это могут быть как базовый уровень надежности, так и абсолютно надежный (отказоустойчивый) уровень – строится инфокоммуникационная инфраструктура ЦОД с двойным резервированием всех систем, обеспечивающая непрерывную работу даже при значительных авариях.

III. Стадия формирования технических требований к инфраструктуре ЦОД с учетом особенностей систем ИИ, размещаемых и функционирующих на базе данной инфраструктуры. Данная стадия предусматривает формулировку требований к помещениям и конструкциям ЦОД с ИИ, к их энергоснабжению, охлаждению, а также к инфокоммуникационной (сетевой и серверной) части инфраструктуры – к количеству и производительности серверов, т.е., к их вычислительной мощности, объему систем хранения (количеству стойко-мест), а также к пропускной способности межсерверных и внутренних каналов обмена данными с учетом повышенных потребностей современных и перспективных интеллектуальных систем.

IV. Стадия формирования требований по обеспечению безопасности инфраструктуры ЦОД с учетом гарантированной безопасности систем ИИ, размещаемых и функционирующих на базе данной инфраструктуры. Речь идет о требованиях к физической безопасности (системы аутентификации, контроля доступа, видеонаблюдения), к пожарной безопасности (пожаротушение, пожарная сигнализация), а также, к информационной безопасности – к традиционным конфиденциальности, целостности и доступности отдельных данных, моделей и структурированных наборов данных (датасетов), которые используется для обучения и тестирования, например, алгоритмов машинного обучения, проведения анализа и решения конкретных задач с использованием искусственного интеллекта.

V. Стадия формирования эксплуатационных требований с учетом потребностей систем ИИ, размещенных и работающих на инфокоммуникационных ресурсах (платформе) современных и перспективных ЦОД [13, 14].

Анализ современных средств и комплексов показывает, что удовлетворять таким требованиям с точки зрения высокой производительности, соответствовать перспективе и выступать ключевым элементом инфраструктуры ЦОД, ориентированного на работу с ИИ, может и должна, так называемая, группа (кластер) объединенных графических процессоров (ГП), в иностранных источниках именуемых GPU (Graphic Processing Unit) – мощных процессоров, работающих одновременно и синхронно, как единый вычислительный «организм». Вместе с тем, специалисты утверждают, что специфика GPU-кластеров невольно обуславливает «свои», уникальные требования не только к инфокоммуникационной инфраструктуре ЦОД, но и к инженерной составляющей объектов такого класса [13].

Таким образом, исследования подтвердили, что повышение заинтересованности в технологиях и системах искусственного интеллекта, которым требуется все больше и больше вычислительных ресурсов, обусловили ускорение роста отрасли ЦОД, дали толчок к решению задач формулировки

и формирования системы новых требований, предъявляемых системами ИИ к инфокоммуникационной инфраструктуре подобных современных и перспективных дата-центров. Это, в свою очередь, предопределило необходимость рассмотрения некоторых важных аспектов анализа и синтеза таких требований, призванных установить, как изменятся не только сами требования к инфокоммуникационной инфраструктуре ЦОД, но и весь механизм (методика) формирования требований к современному и перспективному дата-центру с ИИ-кластером. Проведен анализ некоторых зарубежных и отечественных стандартов, предложены стадии (этапы) общей процедуры, методологически обеспечивающей процесс формирования требований, предъявляемых системами ИИ к инфокоммуникационной инфраструктуре современных и перспективных центров обработки данных.

Список используемых источников

1. Прохоров А. Н., Рахматуллин С. С. Центры обработки данных. Анализ. Тренды. Мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2021. 414 с.

2. Саяркин Л. А., Паращук И. Б., Владимирова Е. С., Селезнев А. В. Автоматизация и управление процессами информационного поиска в Больших Данных с учетом современных аспектов цифровой трансформации // Современные технологии: проблемы и перспективы. Сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых. Севастополь: СевГУ, 2025. С. 137–141.

3. Нагорный К. Д., Чеснов А. А., Чирков Т. А. Эксплуатация ЦОД: Практическое руководство. М.: Альпина ПРО, 2024. 320 с.

4. Докучаев В. А., Кальфа А. А., Маклачкова В. В. Архитектура центров обработки данных. М.: Горячая Линия-Телеком. 2024. 240 с.

5. Паращук И. Б., Михайличенко Н. В. Эффективность современных центров обработки данных // III Межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». Материалы конференции. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 24–26.

6. Жумыкин А. М. Настольная книга эксплуататора. Все, что вы хотели знать о повседневной жизни дата-центров, но боялись спросить. М.: Альпина ПРО. 2022. 263 с.

7. Семенов А. Б. Структурированные кабельные системы для центров обработки данных. М.: ДМК Пресс. 2014. 234 с.

8. Шабанов Б. М., Самоваров О. И. Принципы построения межведомственного центра коллективного пользования общего назначения в модели программно-определяемого ЦОД // Труды института системного программирования РАН, 2018, Т.30, Вып.6. С. 7–24.

9. Елизаров В. В., Паращук И. Б., Салюк Д. В. Обоснование требований к программно-аппаратным комплексам специального назначения для сбора и обработки информации на основе методов интеллектуального анализа большого количества разнородных и неструктурированных данных // Техника средств связи. 2024. № 1 (165). С. 76–89.

10. Software Defined Data Center (SDDC). Future Platform for Private and Public Cloud Services. New York: NTT DATA, 2022. 22 p.

11. International Standard ANSI/TIA-942-C:2024. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. NY: Telecommunications Industry Association (TIA), 2024. 35 p.

12. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 70627-2023. Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Документация. Техническая концепция. Требования к составу и содержанию. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 16 с.

13. Что такое ЦОД для искусственного интеллекта: стратегический обзор «Систэм Электрик» и «ИКС». 2025. URL: https://systeme.ru/news/chto-takoe-tsod-dlya-iskusstvennogo-intellekta-strategicheskii-obzor-sistem-elektrik-i-iks (дата обращения: 18.11.2025).

14. Вышемирский С. В. Искусственный интеллект в дата-центре. Компания IXcellerate. 2024. URL: https://ixcellerate.ru/news/iskusstvennyj-intellekt-v-data-tsentre/ (дата обращения: 18.11.2025).

15. Елизаров В. В., Паращук И. Б., Салюк Д. В. Анализ этапов и критериев выбора современных технологий искусственного интеллекта в интересах построения и совершенствования техники средств связи и автоматизации управления специального назначения // Техника средств связи. 2023. № 1 (161). С. 60–68.

FORMULATION OF REQUIREMENTS IMPOSED BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS ON THE INFORMATION AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURE OF MODERN AND FUTURE DATA CENTERS

Golubev Yu., Parashchuk I., Seleznev A.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This article examines several important aspects of analyzing and synthesizing the requirements imposed by artificial intelligence systems on the infrastructure of modern and future data centers. It also explores issues that allow us to determine how not only these requirements themselves but also the entire mechanism for their formation will change for data centers with intelligent clusters. An analysis of several international and domestic standards is provided, and stages of a general procedure are proposed that methodologically support and guide the process of formulating requirements imposed by artificial intelligence systems on the information and communications component of data centers of this class.

Key words: information and communication infrastructure, data center, artificial intelligence, requirements, performance, graphic processing unit

УДК 530.145
ГРНТИ 29.05.15

ЭФФЕКТЫ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В АНАЛИЗЕ ПРОТОКОЛОВ КРКНП

Р. К. Гончаров, А. Д. Киселев, А. С. Наумчик

Национальный исследовательский университет ИТМО

В работе исследуется влияние неидеальности схем когерентных измерений на асимптотическую стойкость протокола квантового распределения ключа на непрерывных переменных GG02 в сценарии недоверенного шума. Рассматриваемые неидеальности включают в себя разбалансировку светоделителя и неравную квантовую эффективность детектирования. Показано, что неидеальность измерений значительно снижает скорость генерации секретного ключа и длину канала передачи.

квантовое распределение ключа, непрерывные переменные, когерентное детектирование, неидеальные измерения, недоверенный шум.

В экспериментальных реализациях протоколов квантового распределения ключа с непрерывными переменными (КРКНП) [1] используемые когерентные схемы детектирования содержат неидеальные элементы. В сценарии недоверенного шума неидеальность схемы становится уязвимостью: перехватчик может использовать ее для извлечения информации о ключе, снижая защищенность протокола. Такие уязвимости требуют отдельного теоретического анализа.

В работе рассматривается протокол КРКНП с гауссовской модуляцией когерентных состояний GG02 [2], схема которого представлена на рис. 1, в сценарии недоверенного шума [3]. Рассматриваемые параметры неидеальности включают в себя разбалансировку светоделителей и неравную квантовую эффективность детектирования.

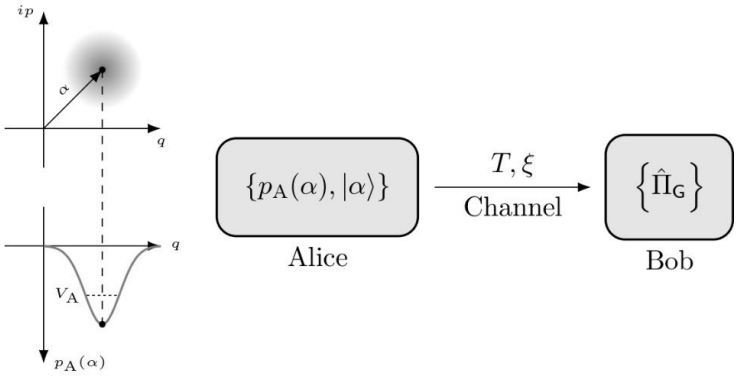


Рис. 1. Схема протокола GG02

Рассматриваются схемы гомодинирования и двойного гомодинирования, которые представлены на рис. 2. Для моделирования неидеальности измерений используется канал с аддитивным шумом (канал классического смешивания [4, 5]), который контролируется перехватчиком.

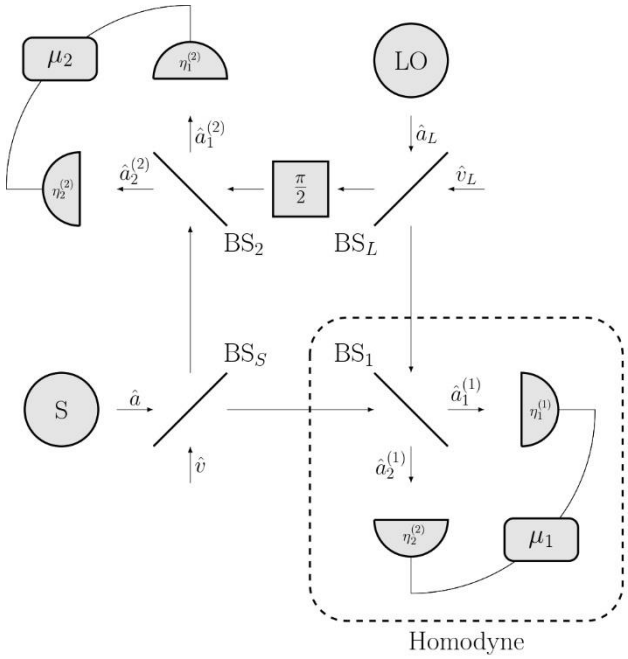


Рис. 2. Схемы гомодинирования и двойного гомодинирования

Измерительный аддитивный шум преобразует исходную ковариационную матрицу [1] следующим образом [5]:

$$\Sigma_{AB} = \begin{pmatrix} V\mathbb{1} & c\sigma_z \\ c\sigma_z & V_B\mathbb{1} \end{pmatrix} \mapsto \Sigma_{AB}^{(\gamma)} = \begin{pmatrix} V\mathbb{1} & c\sigma_z \\ c\sigma_z & V_B\mathbb{1} + \Sigma_N^{(\gamma)} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где V – дисперсия модуляции отправителя, дисперсия получателя:

$$V_B = TV + 1 + \xi,$$

T – пропускание канала передачи; ξ – дисперсия шума канала передачи; матрицы имеют вид:

$$\sigma_z = diag(1,-1), \mathbb{1} = diag(1,1),$$

верхний индекс $\gamma \in \{H, DH\}$ указывает на две схемы детектирования: гомодинирование и двойное гомодинирование; матрицы ковариаций избыточного шума $\Sigma_N^{(\gamma)}$ выражаются через матрицы ковариаций соответствующих положительный операторнозначных мер вероятности (ПОВМ) [5,6]. Симплектические значения [7] матрицы $\Sigma_{AB}^{(\gamma)}$, $\nu_1^{(\gamma)}$ и $\nu_2^{(\gamma)}$, определяют совместную энтропию S_{AB}, которая рассчитывается по формуле

$$S_{AB} = g(\nu_1) + g(\nu_2),$$

где

$$g(x) = \frac{x+1}{2} log_2 \frac{x+1}{2} - \frac{x-1}{2} log_2 \frac{x-1}{2}.$$

Условная энтропия $S_{A|B}^{(\gamma)}$ рассчитывается аналогичным образом из условной матрицы ковариаций:

$$\Sigma_{A|B}^{(\gamma)} = V\mathbb{1} - c^2\sigma_z \left(V_B\mathbb{1} + \Sigma_m^{(\gamma)}\right)^{-1} \sigma_z,$$

где $\Sigma_m^{(\gamma)}$ – ковариационная матрица идеального измерения.

Выражения для взаимной информации между отправителем и получателем имеют вид:

$$I_{AB}^{(H)} = \frac{1}{2} log_2 \left[1 + \frac{T(V-1)}{\sigma_x + \xi}\right],$$
$$I_{AB}^{(DH)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1,2} log_2 \left[1 + \frac{T(V-1)}{2\sigma_i + \xi}\right],$$

где σ_x – дисперсия квадратуры в схеме гомодинирования, σ_i – дисперсия квадратуры в схеме двойного гомодинирования. Скорость генерации секретного ключа рассчитывается по формуле:

$$K^{(\gamma)} = \beta I_{AB}^{(\gamma)} - \chi_{EB}^{(\gamma)} = \beta I_{AB}^{(\gamma)} - \left(S_{AB} - S_{A|B}\right),$$

где β – эффективность согласования.

Результаты численного моделирования скорости генерации ключа в зависимости от длины канала для измерительных схем гомодинирования и двойного гомодинирования представлены на рис. 3. В обоих случаях даже малые неидеальности измерений значительно уменьшают скорость генерации секретного ключа и сокращают максимальную длину передачи. Схема двойного гомодинирования оказывается значительно более чувствительна к неидеальностям: при одинаковых величинах дисперсии квадратур уменьшение длины передачи примерно в 1,5 раза больше, чем в схеме гомодинирования.

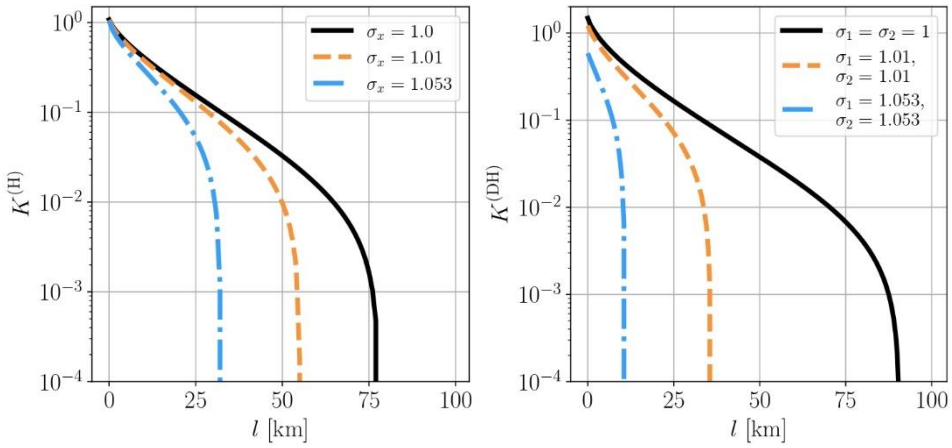


Рис. 3. Зависимость скорости генерации ключа от длины канала передачи для неидеальных схем гомодинирования (слева) и двойного гомодинирования (справа)

Список используемых источников

1. Laudenbach F. et al. Continuous-variable quantum key distribution with Gaussian modulation–the theory of practical implementations //Advanced Quantum Technologies. 2018. Т. 1. № 1. С. 1800011.

2. Grosshans F. et al. Quantum key distribution using gaussian-modulated coherent states //Nature. 2003. Т. 421. № 6920. С. 238-241.

3. Usenko V. C., Filip R. Trusted noise in continuous-variable quantum key distribution: a threat and a defense //Entropy. 2016. Т. 18. № 1. С. 20.

4. Serafini A. Quantum continuous variables: a primer of theoretical methods. CRC press, 2024.

5. Naumchik A. S., Goncharov R. K., Kiselev A. D. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2512.22591 (дата обращения: 18.02.2026).

6. Наумчик А. С., Гончаров Р. К. (науч. рук. Киселев А. Д.) Исследование эффектов асимметрии в схемах гомодинного детектирования // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб: Университет ИТМО, [2025]. URL: https://kmu.itmo.ru/digests/article/1405 (дата обращения: 10.11.2025).

7. Weedbrook C. et al. Gaussian quantum information //Reviews of modern physics. 2012. Т. 84. № 2. С. 621-669.

MEASUREMENT IMPERFECTIONS EFFECTS IN CV-QKD PROTOCOL ANALYSIS

Goncharov R., Kiselev A., Naumchik A.
ITMO University

This paper examines the effects of coherent measurement imperfections on the asymptotic security of the GG02 continuous-variable quantum key distribution protocol under an untrusted noise scenario. Key imperfections analyzed include beam splitter imbalance and unequal quantum detection efficiency. The results demonstrate that these imperfections substantially degrade both the secret key rate and achievable transmission distance.

Key words: CV-QKD, coherent detection, imperfect measurements, untrusted noise

УДК 621.397.7-182.3
ГРНТИ 47.51.31

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI HALOW ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОПОТОКА

А. А. Горынцев, С. Л. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящее время широко известно, что объекты жилого и промышленного комплексов оборудованы типовой системой охраны. Иногда при проектировании таких систем прокладка кабелей для обеспечения соединения невозможна. Частично такую проблему решает организация местной беспроводной сети из бытового оборудования для беспроводных локальных компьютерных сетей. Однако диапазоны частот, в которых работает данное оборудование, сильно подвержены затуханию и их проникающая способность через препятствия ограниченна. Поэтому требуется использовать устройства на основе технологий с более дальнобойной связью и устойчивой связью. В данной работе рассматривается решение данной задачи.

Wi-Fi HaLow, технология, система, радиосвязь, видеонаблюдение

В настоящее время широко известно, что объекты жилого и промышленного комплексов оборудованы типовой системой охраны, состоящей из системы контроля и управления доступом, системы видеонаблюдения, камеры которой могут быть оснащены видеоаналитикой. Такая система состоит из статично установленного проводного оборудования с четко закрепленными участками для охраны. Иногда при проектировании таких систем прокладка кабелей для обеспечения соединения невозможна. Частично такую проблему решает организация местной беспроводной сети из оборудования для беспроводных локальных компьютерных сетей в наборе стандартов IEEE 802.11: 4 (802.11n), 5 (802.11ac), 6 (802.11ax), 6E (802.11ax), 7 (802.11be) [1]. Однако диапазоны частот, в которых работает данное оборудование, сильно подвержены затуханию и их проникающая способность через препятствия ограниченна. Эффективная дальность при передаче потокового видео, при наличии препятствий не более 150 метров. Для увеличения расстояния требуется система усилителей и повторителей.

Помимо препятствий и общего затухания сигнала на канал воздействуют техногенные помехи (от работы электрических установок и электронных устройств) и природные помехи, которые являются атмосферными явлениями и возмущением магнитосферы земли. По отдельности и в совокупности, данные помехи снижают эффективную дальность передачи видеопотока [2].

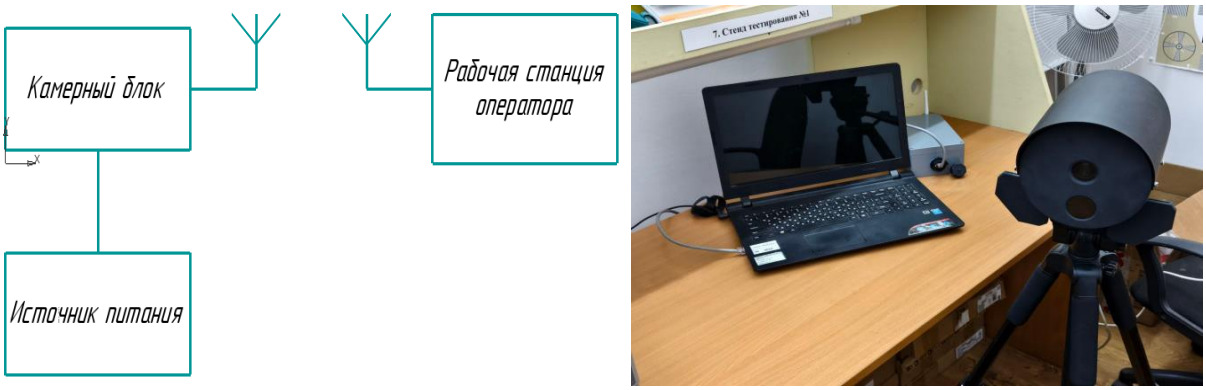
В некоторых обстоятельствах, когда требуется организация связи на расстояниях до 1 км, данных подход не представляется возможным. Поэтому требуется использовать устройства на основе технологий с более «дальнобойной» связью и устойчивой связью.

Технология Wi-Fi HaLow работает в диапазоне частот ниже 1 ГГц, что обеспечивает увеличенную дальность действия и энергоэффективность. Увеличенная дальность действия: узкополосные сигналы Wi-Fi HaLow в диапазоне ниже 1 ГГц распространяются более чем в 10 раз дальше, чем сигналы Wi-Fi на частотах 2,4 ГГц или 5 ГГц, достигая расстояния до 3 км, что позволяет покрывать площадь более чем в 100 раз большую, чем у обычного Wi-Fi.

Функции энергосбережения: Wi-Fi HaLow позволяет передавать больше бит на единицу энергии, чем многие другие беспроводные технологии IoT. Снижение потерь на трассе распространения сигнала: использование частот ниже 1 ГГц в Wi-Fi HaLow значительно снижает потери на трассе распространения сигнала, обеспечивая лучшее проникновение сигнала через такие препятствия, как стены, двери и окна, что приводит к увеличению зоны покрытия при меньшем количестве точек доступа. Эта возможность имеет решающее значение для создания более доступных и надежных сетей, особенно в условиях, где физические барьеры традиционно препятствуют подключению.

Повышенная спектральная эффективность: В ответ на растущую проблему перегрузки сети, работа Wi-Fi HaLow в нелицензированном диапазоне ниже 1 ГГц обеспечивает необходимый дополнительный спектр [3, 4].

С целью экспериментальной проверки была смоделирована и испытана система мобильного видеонаблюдения (СМВ) (рис.1), состоящая из камерного блока, источника питания, рабочей станцией оператора.



а) б)

Рис. 1. а) структурная схема системы СМВ, б) внешний вид системы СМВ

Основной составляющей системы СМВ является камерный блок. Основными его функциями являются формирование и передача видеоизображения с разрешением 1080pi по радиоканалу. Заявленные теоретические характеристики приемо-передающей части:

– стандарт передачи информации – Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah);
– частота передачи – 863-868 МГц;
– расчетное расстояние для передачи видеопотока – до 1000м, с проходимостью до 5 бетонных стен;
– используемая антенна – всенаправленная, 19 см, 2 дБи.

Экспериментальная поверка проводилась на расстоянии (приблизительно) 10 метров (в качестве эталонного значения), 50 метров, 100 метров, 250 метров, 500 метров, 1 километр на участках местности:

– открытый участок местности с условной прямой видимостью с наличием препятствий в виде деревьев и кустарников;
– закрытый участок в виде коридорных секций, помещений, межэтажных перекрытий внутри здания.

В результате работы системы СМВ (рис.2) были получены видеоизображения с камерного блока, соединенного с рабочей станцией оператора радиосвязью, а именно – результаты перемещения объекта в кадре без задержек в режиме реального времени (табл. 1).



а) б)

Рис. 2. а) изображения с рабочей станции на открытом, б) изображения с рабочей станции на закрытом участке

ТАБЛИЦА 1. Результаты экспериментальной проверки

Расстояние, м	Скорость передачи данных, Мбит/с		Субъективная оценка*	
	Открытая местность	Закрытая местность	Открытая местность	Закрытая местность
10	11	9	5	5
50	10	8	5	4
100	8,5	7	4	4
250	8	5	4	3
500	7,5	3,5	3	2
1000	7	2	3	1

(* 1 – нет видеопотока, 2 – видеопоток представлен отдельными редкими кадрами, 3 – видеопоток представлен длительными задержками и артефактами на изображении, 4 – видеопоток представлен короткими периодическими задержками, и редкими проявлениями артефактов на изображения, 5 – видеопоток без задержек и артефактов)

В ходе проведенной экспериментальной проверки были проведены испытания работоспособности рассмотренной системы. Рабочая станция оператора принимала видеопоток данных на удаленной дистанции.

Проведенный эксперимент позволил также выявить соотношение влияния расстояния и препятствий на качество видеопотока, а именно: наличие задержки видеопотока, нарушение «картинки» и получение артефактов на изображении. В ходе исследования было выяснено, что данное влияние на канал передачи, помимо естественных помех и преград, также оказывался множеством высоковольтных силовых линий, большим количеством трансформаторов и другим разным промышленным оборудованием, так как проверка проводилась в промышленной зоне.

Проведенный эксперимент показал целесообразность применения данной технологии для организации мобильных комплексов систем наблюдения. Такой способ организации охранного видеонаблюдения следует считать перспективным для использования на большинстве объектов, на которых контроль безопасности осуществляется с минимальными возможностями по прокладке кабелей.

Список используемых источников

1. Сайт «ZSC». «Основные стандарты беспроводных локальных сетей» URL: https://zscomp.ru/news/Standarti_besprovodnih_lokalnih_setei_text_/ (дата обращения: 12.01.2026).

2. Сайт «Keenetic». «Что влияет на работу беспроводных сетей Wi-Fi? Что может являться источником помех и каковы их возможные причины?» URL: https://help.keenetic.com/hc/ru/articles/213968709 (дата обращения: 12.01.2026).

3. Сайт «Хабр». «HaLow: дальнобойный Wi-Fi, который работает на расстоянии в несколько километров» URL: https://habr.com/ru/companies/ru_mts/articles/791858/ (дата обращения: 12.01.2026).

4. Сайт «CNET». «Устройства для умного дома с поддержкой Wi-Fi нового поколения могут иметь радиус действия более 1 километра» URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.992037c6-699eeebd-7edff014-74722d776562/https/www.cnet.com/home/internet/next-gen-wi-fi-smart-home-gadgets-could-come-with-over-1-kilometer-of-range/ (дата обращения: 12.01.2026).

USING WI-FI HALOW TECHNOLOGY FOR VIDEO STREAMING

Gorincev A., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

It's common knowledge that residential and industrial complexes are equipped with standard security systems. Sometimes, when designing such systems, laying cables to ensure connectivity is impossible. A partial solution to this problem is to set up a local wireless network using household wireless local area network equipment. However, the frequency ranges in which this equipment operates are highly susceptible to attenuation, and their penetration through obstacles is limited. Therefore, it is necessary to use devices based on technologies with longer range and more stable communication. This paper examines a solution to this problem.

Key words: Wi-Fi HaLow, technology, system, radio communication, video surveillance

УДК 621.396.712
ГРНТИ 49.43.3

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЛОКА ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ DRM

О. А. Гуминский, Ю. А. Ковалгин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Разработан метод временной синхронизации приемного оборудования системы цифрового радиовещания DRM для режима устойчивости E; на его основе реализована в среде Matlab/Simulink имитационная блока временной синхронизации, оценена эффективность его работы в составе имитационной модели приемопередающего тракта системы DRM.

цифровое радиовещание, DRM, временная синхронизация

Введение. Известно большое число работ, посвященных проблеме временной синхронизации OFDM-сигналов, среди них, прежде всего, следует назвать такие работы как [1-3]. Из анализа их содержания следует, что для временной оценки начала полезной (информационной) части OFDM-символов может быть использован циклический префикс (защитный интервал) и (или) пилотные поднесущие частоты, параметры (частоты, амплитуды, фазы) и расположение которых в частотно-временной сетке OFDM-сигнала для систем цифрового радиовещания (ЦРВ) заданы стандартом и по этой причине могут быть использованы приемником для временной, частотной и кадровой синхронизации, а также и для компенсации искажений радиоканала.

Цель работы. Целью данного исследования является разработка метода временной синхронизации на основе циклического префикса OFDM-сигнала, оценка его точности и помехоустойчивости для системы DRM при ее работе в режиме устойчивости E (диапазон ОВЧ).

Основная часть. Поиск временного положения начала информационной (полезной) части OFDM-символов T_{sub} при использовании циклического префикса CP обычно выполняется с помощью оконных функций w_1 и w_2 длительностью T_G, сдвинутых во времени друг относительно друга на величину T_{sub} (рис.1). С их помощью для последующего анализа выделя-

ются группы отсчетов из защитного интервала CP и завершающей полезной части OFDM-символов.

В публикациях предложено большое число критериев для оценки (поиска) начала полезной части OFDM-символов [1-5], однако анализ их содержания показывает, что при наличии в радиоканале аддитивного гауссовского белого шума (АГБШ, AWGN) и достаточно малом отношении сигнал/шум (SNR, дБ) лучшие результаты обеспечивает критерий *ML-Maximum Likelihood*, имеющий вид:

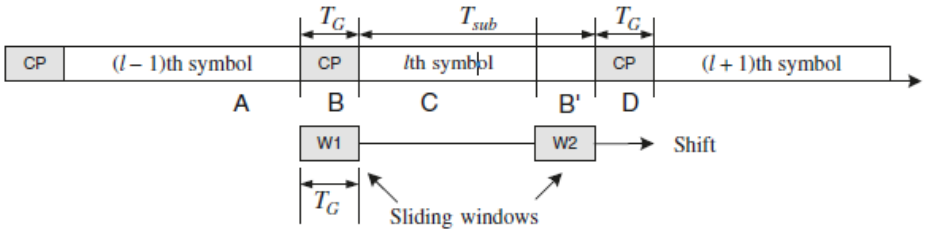


Рис. 1. К оценке временной синхронизации OFDM-символов по циклическому префиксу (защитному интервалу) CP, [4]

$$\hat{\delta}\big|_{t=nT} = arg_{\delta} max\ (y([\delta])$$

$$y[\delta] = \sum_{k=0}^{N_G-1} \{\,|y(n+k)\cdot y^*(n+k+N_{sub})| - \frac{1}{2}[|y(n+k)|^2 + |y(n+k+N_{sub}|^2]\} \quad (1)$$

где: n – номер (индекс) текущего отчета дискретизированной временной функции OFDM-сигнала $y(t)$; $y(n+k)$ – отсчеты выборки оконной функцией w_1, причем k – это порядковый номер отсчета сигнала данной выборки; $y(n+k+N_{sub})$ – отсчеты выборки оконной функцией w_2, сдвинутые по времени относительно отсчетов функции $y(n+k)$ на величину N_{sub}, где k – это, как и ранее, порядковый номер отсчета сигнала данной выборки; N_{sub} – число отсчетов временной функции дискретизированного OFDM-сигнала на интервале полезной (информационной) части T_{sub} OFDM-символа; N_G – число отсчетов временной функции OFDM-сигнала на защитном интервале T_G; t – текущее время; T – интервал (период) дискретизации; $y^*(n+k+N_{sub})$ – комплексно-сопряженный отсчет временной функции дискретизированного сигнала выборки оконной функцией w_2, сдвинутый по времени относительно отсчета $y(n+k)$ на величину N_{sub}.

Блок временной синхронизации был реализован в среде Matlab/Simulink. Для оценки эффективности его работы он был встроен в приемный тракт имитационной модели [6] приемопередающего тракта системы DRM.

Критерий *ML* (1) был реализован в виде имитационной модели, представленной на рис. 2, не требующей отдельного пояснения.

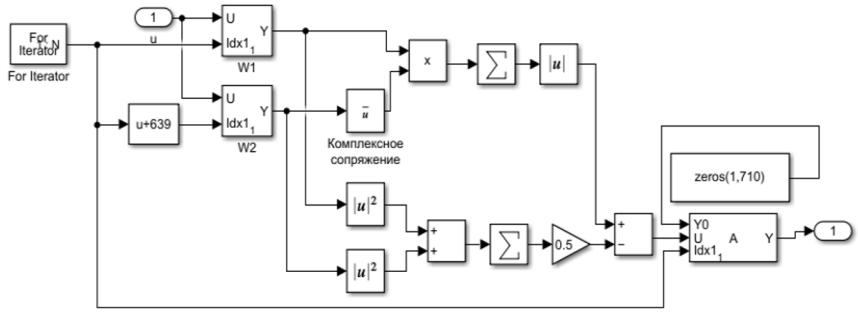


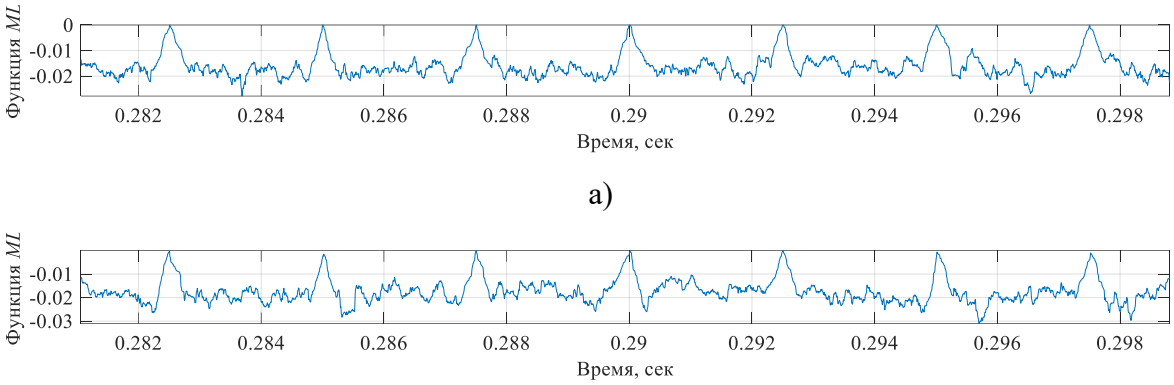
Рис. 2. Имитационная модель реализации *ML*-критерия

Напомним [7], что при DRM-приеме минимально требуемое для комфортного прослушивания значение SNR при модуляции QAM-4 для разных уровней защиты PL должно быть не менее 2,27-4,09 дБ, а при модуляции QAM-16 – не менее 7,64 – 11,4 дБ соответственно. Кроме того, [7], для сохранения условий комфортного прослушивания величина временного сдвига τ OFDM-сигнала относительно начала полезной части OFDM-символов при модуляции QAM-4 не должна превышать 1,9 -2,25 мкс; при модуляции QAM-16 – это величина должна быть не более 0,8-1,3 мкс. Разброс этих значений определяется уровнем защиты PL.

Частота дискретизации принимаемого сигнала на входе приемника составляла 284 кГц, при этом защитный интервал содержал 71 отсчет, информационная часть – 639 отсчетов дискретизированного OFDM-сигнала. Сдвиг момента старта прямого ДПФ от начала полезной части OFDM-символа на один отсчет (период дискретизации) составлял соответственно 3,5 мкс.

Результаты исследования, выполненные на этом первом этапе, представлены на рис. 3 и рис. 4. Здесь в обоих случаях по оси абсцисс отложены индексы отсчетов дискретизированного OFDM-сигнала (т.е. текущее время в сек). На рис.3 приведены временные функции критерия *ML для* двух значений SNR соответственно равных 10 дБ и 2,5 дБ, по оси ординат отложены значения критерия *ML*, вычисленные по формуле (1). На рис. 4 показаны результаты оценки его максимальных значений также при двух разных

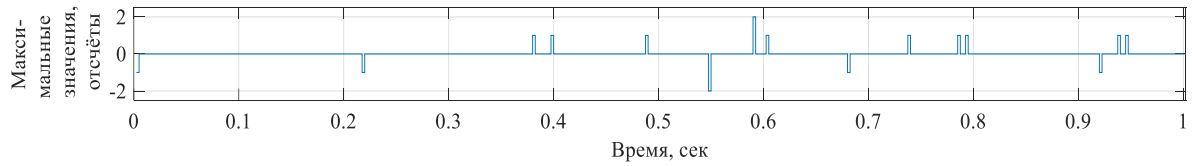
уровнях шума в канале. По оси ординат на рис.4 даны результаты оценки положений максимумов функции *ML*.



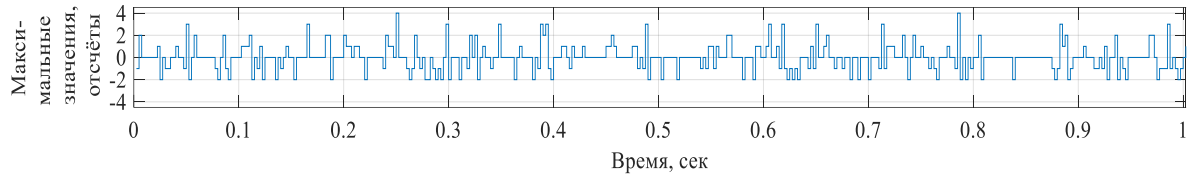
а)

б)

Рис. 3. Кривые изменения функции *ML* во времени при DRM-приеме для модуляции QAM-4 и уровне защиты PL0: а – SNR = 10 дБ, б- SNR = 2,5 дБ



а)



б)

Рис. 4. Результаты оценки положений максимумов функции *ML*:
а – SNR = 10 дБ, б- SNR = 2,5 дБ

Видно, что с увеличением уровня шума в канале форма максимума функции *ML* уплощается, становится менее четкой (рис. 3). Появляются ошибки (отклонения от прямой горизонтальной линии, рис. 4) в оценке начала полезной части OFDM-символов. При этом появление ошибок носит случайный характер, их число и величина возрастают с уменьшением SNR. Например, при SNR = 2,5 дБ ее наибольшее значение составляет 4 отсчета (периода дискретизации), что равно 14,09 мкс при среднем значении равном 0,69 (2,43 мкс) периода дискретизации OFDM-сигнала. Полученные отклонения τ, мкс, в моменте старта прямого ДПФ часто превышают допустимые

значения [7], что недопустимо и требует дополнительной обработки полученного массива данных (1).

На втором этапе из полученного массива данных отбираются только те отсчеты функции *ML*, величина которых превышает пороговое значение равное $Th_1 >= -0{,}003$. При этом, если для текущего дискретизированного значения функции *ML* данное условие не выполняется, то оно заменяется предыдущим значением, для которого оно выполнено. Для выполнения данной процедуры использовался блок Switch (рис. 5).

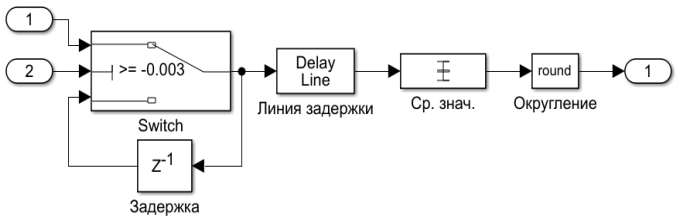


Рис. 5. Имитационная модель второго этапа обработки массива данных функции *ML*

Далее на данном этапе для каждого текущего отсчета вычислялось его среднее значение. Операция усреднения учитывала 10 предшествующих ему значений функции *ML*, Эта процедура выполнялась с помощью линии задержки Delay Iine (рис. 5). И наконец, полученное текущее среднее значение, если оно дробное, округлялось до ближайшего целого значения (блок round на рис. 5).

Для того, чтобы не учитывались сильно отличающиеся по величине текущие средние значения функции *ML*, полученные на втором этапе вычислений, а также значения, полученные более 1000 мс назад, на третьем этапе учет текущих значений функции *ML* производился по двум параметрам: по размаху и по времени отклонения значений индекса отсчетов OFDM-сигнала от момента начала полезной части OFDM-символа (рис. 6).

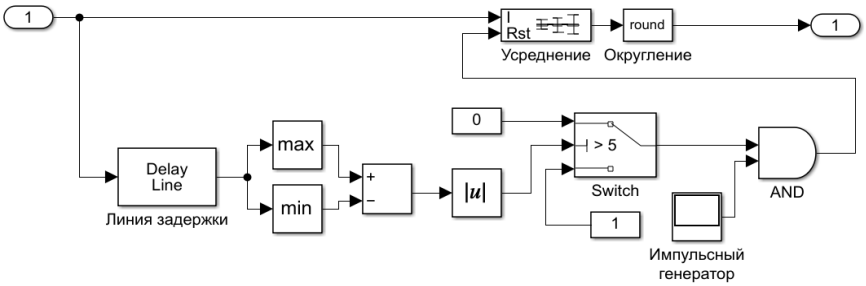


Рис. 6. Имитационная модель третьего этапа обработки данных функции *ML*

Для этого на блок усреднения подается сигнал сброса, полученный суммой двух сигналов. Первый сигнал формируется импульсным генерато-

ром, который подает на выход импульсы, с периодичностью 1000 мс. Второй сигнал формировался за счет наличия отклонения значений индекса стартового отсчета, определяющего начало полезной части OFDM-символа, более чем на 5 отсчетов.

Результат работы блока синхронизации в целом иллюстрирует рис. 7. Видно, что после первого этапа (рис. 7а) присутствует сильное отклонение значений индекса максимального отсчета для старта прямого ДПФ, иногда составляющее более 5-10 отсчетов. После второго этапа обработки данных (рис. 7б) отклонение от требуемого значения не превышает уже 1-2 отсчетов. После третьего этапа (рис. 7в) результат определения стартового индекса отсчета, определяющего временное положение окна ДПФ, стал более ровным и с наименьшими отклонениями.

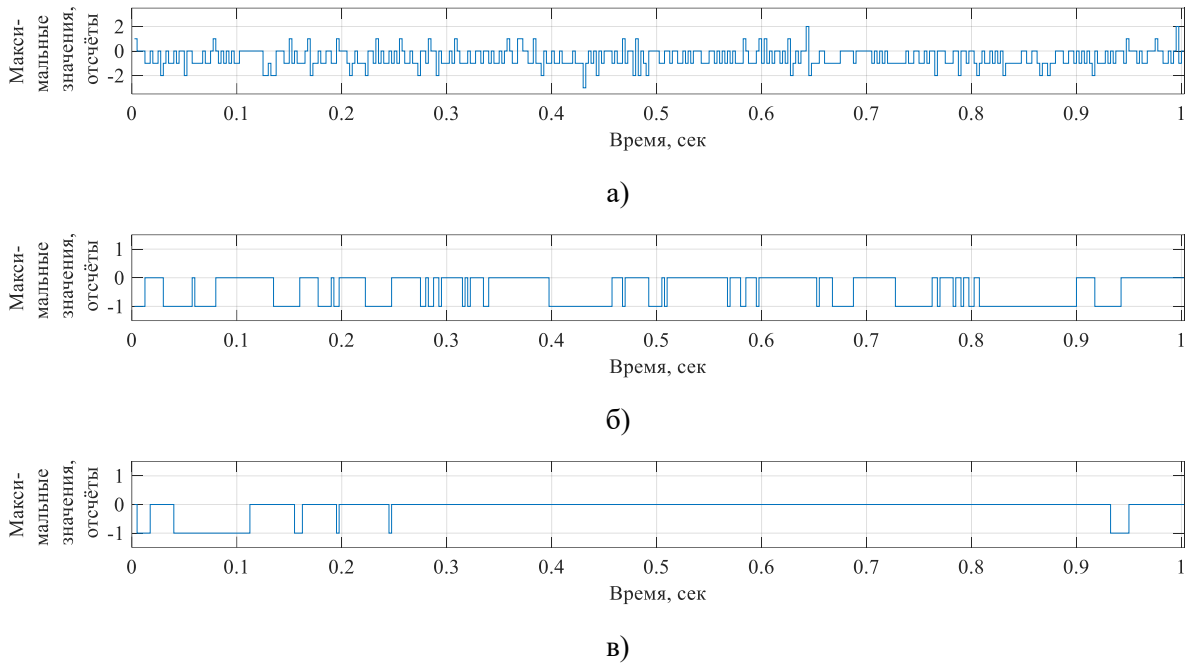


Рис. 7. Этапы работы блока временной синхронизации

Заключение. Предложенный метод временной синхронизации обеспечивает комфортный прием DRM-сигнала для всех режимов работы, что подтверждено результатами имитационного моделирования.

Список используемых источников

Технология OFDM. Учебное пособие для вузов / Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Шлома А. М. и др. Горячая линия – Телеком, 2016. 352 с.

2. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang. Mimo-OFDM Wireless Communications With Matlab // IEEE Press. Yohn Wiley &Sons (Asia) Pte Ltd. 2 Clementi Loop, Singapore 129809# 02-01.

3. Fazel, Khaled. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. Wiley. A John Wiley and Sons, Ltd, Publication.

4. Cho Y. S. et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley Sons, 2010.

5. Батырев И. А. Методы синхронизации OFDM-сигнала по циклическому префиксу// Техника радиосвязи. 2018. Вып. 1 (36). С. 90–102.

6. Гуминский О. А. Модель приемо-передающего тракта системы цифрового радиовещания DRM+. URL: https://cloud.mail.ru/public/AxE9/9nJmYeYHv (дата обращения: 24.03.2025)

7. Гуминский О. А., Ковалгин Ю. А. О требуемой точности временной синхронизации оборудования при DRM-приеме // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 2. С. 20–31. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-20-31. EDN: LQOXKV.

SIMULATION MODEL OF THE TIME SYNCHRONIZATION UNIT OF RECEIVING EQUIPMENT DRM SYSTEM

Guminsky O., Kovalgin Yu.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

A method for time synchronization of the receiving equipment of the DRM digital broadcasting system for the E stability mode has been developed. Based on this method, a simulation block for time synchronization has been implemented in the Matlab/Simulink environment, and its effectiveness has been evaluated as part of the simulation model of the DRM system's transceiver path.

Key words: digital radio broadcasting, DRM, time synchronization

УДК 004.7
ГРНТИ 49.33.29

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ QOS В СЕТЯХ SDN

Ю. С. Дмитриева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье разработана методики комплексной оценки параметров QoS в сетях SDN на основе приведения разнородных параметров качества различных типов трафика к единому комбинированному показателю. В рамках достижения поставленной цели предлагается механизм приведения параметров QoS к единому комбинированному значению с использованием нормализующих весовых коэффициентов. Такой подход позволяет осуществлять более обоснованный и эффективный выбор сетевого элемента для балансировки.

software-Defined Networking (SDN), программно-конфигурируемая сеть (ПКС), балансировка нагрузки, качество обслуживания, Quality of Service (QoS), SLA (Service Level Agreement)

Современные телекоммуникационные сети сталкиваются с беспрецедентным ростом объема и разнообразия трафика. В этих условиях обеспечение гарантированного качества обслуживания (QoS) становится критически важной задачей для операторов связи и провайдеров услуг.

В современных алгоритмах балансировки ограниченный набор метрик: алгоритмы, как правило, используют небольшой набор параметров (1-2), таких как загрузка или сетевая задержка, игнорируя другие критически важные для QoS показатели, такие как джиттер, потери пакетов и их комбинации [1].

Не решена проблема приведения разнородных параметров QoS с разными единицами измерения к единой шкале для формирования интегральной оценки состояния сетевого элемента [2-4].

Проанализировав существующие методы балансировки трафика в сети SDN выделены следующие недостатки:

– отсутствует многопараметрический подход к QoS, где для коммутаторов учитываются параметры: потери пакетов, задержка, джиттер;
– рассмотренные алгоритмы не учитывают нормализацию разнородных-параметров QoS;

– рассмотренные алгоритмы не учитывают критерии SLA к разным классам сервиса: Real Time, Business Critical, Best Effort.

Для решения вышеперечисленных проблем предлагается методика комплексной оценки параметров QoS в сетях SDN на основе приведения параметров QoS различных типов трафика к комбинированному показателю для применения в алгоритмах балансировки.

Полагаем, что имеется несколько SDN коммутаторов, образующих сеть, обслуживающую трафик, включенных в них пользователей (рис. 1).

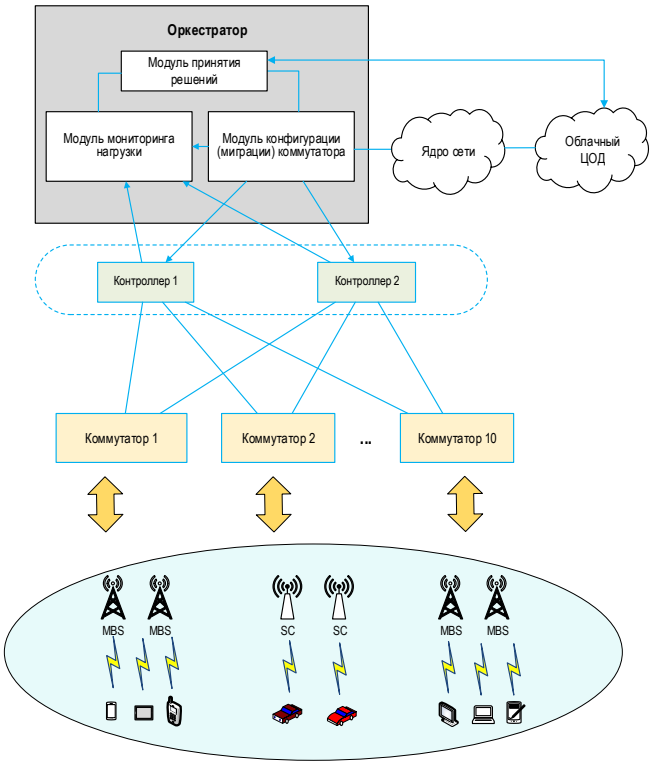


Рис. 1. Архитектура сети SDN

Для повышения качества клиентских сервисов необходимо учитывать при балансировке нагрузки не только нагрузку на коммутаторе, но и параметры QoS для запроса на коммутаторе.

Как образец качества клиентских сервисов возможно взять общедоступные договора Российских операторов связи, в них указываются конкретные параметры QoS для разного типа трафика и уровня SLA, которые опираются на рекомендацию Международного союза электросвязи [5].

Проанализируем параметры QoS в договорах крупных операторов связи и для примера приведем стандартные требования к QoS из договора Билайн (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Параметры качества услуги SLA Билайн

Параметр	Best Effort	Standart	Premium	Real Time
Односторонняя сетевая задержка	-	100 ms	80 ms	40 ms
Неравномерность сетевой задержки (Jitter)	-	-	-	20 ms
% потери Пакетов	-	1 %	0,2 %	0,1 %

Полученные результаты измерений предоставленного исполнителем канала связи усредняются для месячного периода.

Проанализировав параметры QoS в договорах операторов связи. Делаем вывод, что все операторы связи указывают три параметра QoS: jitter, ping, loss of packet. Значения данных параметров варьируется от уровня обслуживания SLA.

Таким образом, при балансировке трафика на коммутаторах необходимо учитывать и улучшать параметры QoS: loss of packet, ping, jitter. Для повышения качества клиентских сервисов модель балансировки нагрузки должна учитывать не только нагрузку на элементы сети, но и параметры QoS.

При балансировке сетевого трафика с использованием параметров QoS учитываются параметры с разными единицами измерения и возникает вопрос о нормализации параметров QoS, так как они различны по своим единицам измерения.

Каждый из параметров оказывает влияние на сервис, поэтому необходимо оценить их влияние. Для этого определяем нормализующий коэффициент C_{ij} для каждого параметра: потери пакетов (Loss of packet), задержка (Ping), джиттер (Jitter).

Для того чтобы решить, на какой коммутатор перенаправить соединение, оркестратору необходимо сравнить значения соответствующих параметров для каждого коммутатора. Для этого необходимо сформировать из собранных параметров матрицу B (1) с a_{ij}, где i – порядковый номер параметра (i = 1,…, k), а j – номер коммутатора (j = 1, ..., n).

1. Потери пакетов (Loss of packet) – ℓp;
2. Задержка (Ping) – ping;
3. Джиттер (Jitter) – jitter.

Разное влияние на сервис оказывает каждый из параметров. Поэтому необходимо оценить влияние каждого параметра, определяем нормализующий коэффициент C_{ij} для каждого параметра.

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{3} C_{ij} = 1$$

Элемент b_{ij} в матрице B (1) умножается на нормализующий коэффициент C_{ij}.

$$B = \left\| b_{ij} \right\|_{(3*n)} = \begin{pmatrix} C_{11}b_{\ell p_1} & C_{21}b_{\ell p_2} & \cdots & C_{n1}b_{\ell p_n} \\ C_{12}b_{ping_1} & C_{21}b_{lping_2} & \cdots & C_{n2}b_{ping_n} \\ C_{13}b_{jitter_1} & C_{23}b_{jitter_2} & \cdots & C_{n3}b_{jitter_n} \end{pmatrix} (1)$$

Таким образом, получаем информацию о минимальной средневзвешенной оценке коммутатора. Направляя запрос на коммутатор с минимальной средневзвешенной оценкой, получаем максимальные параметры качества QoS для данного запроса.

Алгоритм нормализации параметров QoS коммутатора для расчета

Произведем поэтапно расчет нормализованной суммы параметров QoS для коммутатора.

Сумма нормализованных значений:

$$w_{QoS} = w_{\ell p} + w_{ping} + w_{jitter}\ , \qquad (2)$$

где $w_{\ell \text{p}}$ – нормализованный «вес» значения loss of packet $\text{b}_{\ell \text{p}}$,

w_{ping} – нормализованный «вес» значения ping b_{ping},

w_{jitter} – нормализованный «вес» значения jitter b_{jitter},

n – количество коммутаторов.

Для нормализации необходимо привести значения в разных единицах измерения к одному единому виду, который позволит сравнивать их между собой или использовать для расчета, для это введем пределы параметров ℓp, ping и jitter (для примера возьмем параметры QoS из договора Билайн):

1. Введем ограничения для параметров потери пакетов ℓp, задержка ping, джиттер jitter: ℓp от 0 до 0,1 %; ping от 1 до 80 мс; jitter от 0..20 мс.

2. Произведем нормализацию, т.е. приведем к единому виду параметры, имеющие разные единицы измерения: ℓp от 0 до 0,1 % умножаем на 10000 и делим на 10; ping от 1 до 80 мс делим на 80; jitter от 0..20 мс делим на 20.

3. Из договоров операторов связи для трафика Real Time значения параметров QoS самые строгие и равнозначны между собой. Применяем нормализующий коэффициент потери пакетов $C_{1j} = 0{,}33$, задержка $C_{2j} = 0{,}33$ и джиттер $C_{3j} = 0{,}33$.

Получим весовой коэффициент параметров QoS коммутатора, выполнив действия 1-3 для (2):

$$w_{QoS} = \frac{\ell p \times 10000}{10} \times 0{,}33 + \frac{ping}{80} \times 0{,}33 + \frac{jitter}{20} \times 0{,}33$$

Получили весовой коэффициент для трех параметров QoS, которые оцениваются в клиентских сервисах. При применении на конкретной сети весовые коэффициенты конкретных параметров могут корректироваться для учета особенностей данной сети и типа трафика.

На основе проведенного исследования и анализа существующих методов балансировки нагрузки в сетях SDN выявлены ключевые недостатки современных подходов: используется ограниченный набор параметров QoS (обычно 1–2 параметра), что не позволяет полноценно оценивать качество обслуживания; отсутствуют механизмы нормализации разнородных параметров QoS с разными единицами измерения, что затрудняет их совместный анализ и сравнение.

В данной работе предложена методика комплексной оценки QoS: разработан подход, позволяющий приводить разнородные параметры QoS к единому комбинированному показателю с использованием нормализующих весовых коэффициентов; для коммутаторов учтены параметры: потери пакетов, задержка и джиттер, что соответствует требованиям QoS договоров крупных операторов связи.

Разработан алгоритм нормализации и оценки «веса» параметров: предложены формулы для расчета весовых коэффициентов QoS для коммутаторов; алгоритм включает этапы приведения параметров к единой шкале, определения весовых коэффициентов и формирования интегральной оценки состояния сетевого элемента; методика позволяет адаптировать весовые коэффициенты под особенности конкретной сети.

Предложенный подход обеспечивает обоснованный и эффективный выбор сетевых элементов для маршрутизации, что способствует повышению качества клиентских сервисов; учет параметров QoS в процессе балансировки нагрузки позволяет операторам связи лучше соблюдать условия SLA и открывает новые перспективы для создания адаптивных, QoS-ориентированных систем балансировки нагрузки, учитывающих «веса» различных параметров QoS.

Статья представлена доцентом кафедры ИКС СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом В. С. Елагиным.

Список используемых источников

1. Mohammad Rostami, Salman Goli. An overview of QoS-aware load balancing techniques in SDN-based IoT networks // Journal of Cloud Computing 13(1). 2024. DOI: 10.1186/s13677-024-00651-7.

2. Marjan Mahmoudi, Avid Avokh, Behrang Barekatain. SDN-DVFS: an enhanced QoS-aware load-balancing method in software defined networks // Cluster Computing 25(1). 2022. DOI: 10.1007/s10586-021-03522-x.

3. Bharanidharan C., Indira Gandhi S., Devapriya R. D. An Enhanced Framework for Traffic Load Balancing and QoS Provisioning in SDN // Wireless Personal Communications 121(4):1-22. 2021. DOI: 10.1007/s11277-021-08886-2.

4. Manel Majdoub, Ali El Kamel, Habib Youssef. QoS-Aware Cross-Domain Routing in SDN: A Comparative Study Between Competitive and Cooperative MARL Approaches // 2024. Vol. 5. Article number 979.

5. ITU-T Y.1541 (08/2019). Целевые показатели производительности сетей для услуг на основе IP // Международный союз электросвязи (ITU). 2019. URL: https://www.itu.int/rec/R-REC-Y.1541-201908-RU.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF QOS PARAMETERS IN SDN NETWORKS

Dmitrieva J.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article developed a methodology for a comprehensive assessment of QoS parameters in SDN networks based on the reduction of heterogeneous quality parameters of different types of traffic to a single combined indicator. To achieve this goal, a mechanism is proposed for reducing QoS parameters to a single combined value using normalizing weight coefficients. This approach allows for a more reasonable and efficient selection of a network element for balancing.

Key words: Software-Defined Networking (SDN), load balancing, quality of service, Quality of Service (QoS), SLA (Service Level Agreement)

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

В. В. Дуклау, Т. Г. Смаглиенко, С. Л. Федоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Дистанционное проведение лабораторных и практических занятий предполагает предварительное дистанционное тестирование знаний студентов по ключевым вопросам теоретических разделов изучаемой дисциплины и углубленную проработку вопросов, затрагиваемых на практических занятиях и в лабораторном практикуме. Предлагаемая методика занятий будет особенно полезна студентам при отсутствии технической возможности их явки в вуз на лекционные, лабораторные и практические занятия.

методика, лабораторная работа, практические занятия, скриншот

Предлагаемая методика проведения дистанционных лабораторных и практических занятий предполагает дистанционное тестирование знаний студентов по ключевым вопросам дисциплин телевизионного направления при отсутствии технической возможности явки студента в вуз на лабораторные и практические занятия.

Для проведения дистанционного тестирования знаний студенту высылается подготовленный кафедрой пакет контрольно-измерительных материалов по дисциплине, содержащий набор заданий, который включает:

– тесты с теоретическими вопросами по ключевым разделам изучаемой дисциплины с вариантами ответов;
– краткое изложение цели лабораторного исследования со скриншотами осциллограмм по каждому пункту работы. Студент должен обосновать форму осциллограммы в данной точке исследуемой структурной схемы и на масштабной сетке указать все временные и амплитудные параметры исследуемого сигнала;
– тесты с задачами, подразумевающими проведение расчета, построение графика, структурной схемы, характеристики и т.п. Полученные результаты должны быть прокомментированы студентом;

– краткий комментарий к теоретическим вопросам, рассматриваемым в данном задании;
– ссылки на литературу(источники), в которой подробно рассмотрен изучаемый вопрос.

Кафедрой подготовлены материалы для реализации приведенного алгоритма общения со студентами на примере дисциплины, изучаемой на кафедре цифрового телевидения и метрологии (ЦТМ): «Физические основы формирования видеоконтента».

Предполагается подготовить аналогичные материалы и по остальным дисциплинам кафедры ЦТМ, в том числе и для студентов заочной формы обучения.

Дистанционное проведение практических занятий предполагает применение разработанных на кафедре тестов по каждому разделу изучаемой дисциплины. Тесты опираются на рекомендованную рабочей программой дисциплины, основную и дополнительную литературу.

Особенность предлагаемой методики дистанционного выполнения лабораторных работ состоит в использовании скриншотов заранее подготовленных осциллограмм с возможностью измерения по ним временных и амплитудных параметров исследуемых сигналов.

Примеры скриншотов осциллограмм исследуемых сигналов приведены на рис. 1...4.

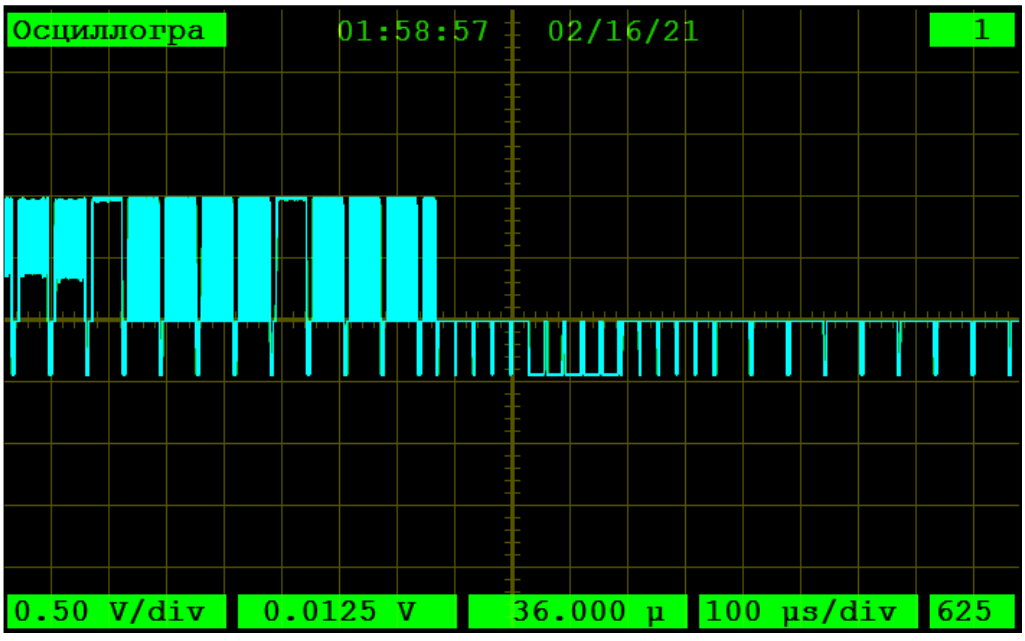


Рис. 1. Измерение длительности кадрового синхроимпульса в составе полного телевизионного сигнала



Рис. 2. Измерение параметров полного телевизионного сигнала изображения клина градаций яркости универсальной электронной испытательной таблицы (УЭИТ) на частоте, кратной частоте строчной развертки.



Рис. 3. Измерение длительности переходного процесса по осциллограмме видеосигнала изображения «шахматное поле» – фрагмента испытательной таблицы УЭИТ

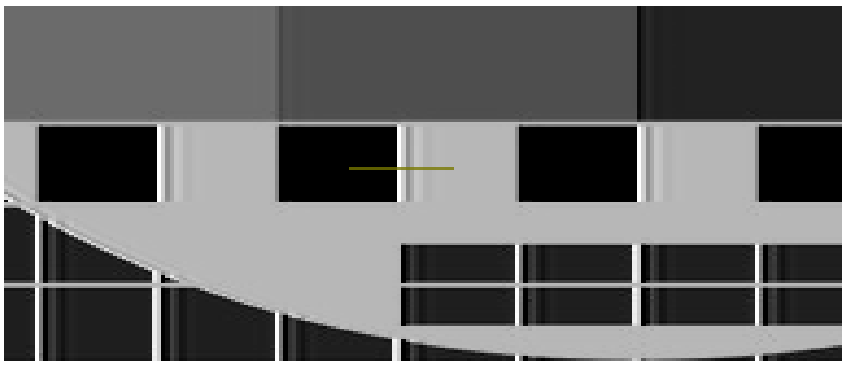


Рис. 4. Изображение «шахматное поле» – фрагмент испытательной таблицы УЭИТ

Предлагаемая методика дистанционного проведения занятий позволит преподавателю сделать обоснованный вывод об уровне подготовки студента по дисциплинам кафедры**.**

Список используемых источников

1. Телевидение: Лабораторный практикум / Под. ред. проф. А. А. Гоголя. СПб: Линк, 2009. 192 с.

METHODOLOGY FOR CONDUCTING DISTANCE LABORATORY AND PRACTICAL CLASSES FOR FULL-TIME STUDENTS.

Duklau V., Smaglienko T., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Conducting laboratory and practical classes remotely involves preliminary remote testing of students\' knowledge on key topics in the theoretical sections of the subject being studied and in-depth study of the issues covered in practical classes and laboratory workshops. This proposed teaching method will be especially useful for students who are unable to attend lectures, laboratory classes, and practical classes at the university.

Key words: methodology, practical classes, laboratory classes

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

ОСОБЕННОСТИ ПРОТОКОЛА TSN И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

В. С. Елагин, А. И. Читанава

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Технология сетей, чувствительных ко времени TSN, представляющая собой набор стандартов IEEE 802.1, призвана усовершенствовать технологию Ethernet для обеспечения детерминизма, возможностей функционирования в режиме реального времени и повышения надежности в проводных сетях связи. В контексте высоких скоростей передачи данных, сверхнизких задержек и минимального джиттера, интеграция технологий 5G и TSN рассматривается как ключевое направление развития, способное обеспечить комплексную беспроводную поддержку для сервисов Ethernet-TSN.

5G, TSN, сетевое моделирование, качество обслуживания QoS, синхронизация времени, планирование трафика.

Многочисленные цифровые приложения, прежде всего в таких динамично развивающихся отраслях, как промышленная автоматизация, автомобилестроение и интеллектуальные транспортные системы, предъявляют все более жесткие нормативы не только к пропускной способности каналов связи, но и к гарантированной своевременности доставки информации, что включает в себя низкие значения задержки и ее вариации (джиттера), а также высокую степень надежности передачи [1].

TSN позволяет осуществлять заблаговременное планирование доставки пакетов, осуществлять управление потоками трафика и предотвращать перегрузки, приоритизируя трафик реального времени.

Интеграция технологий 5G и TSN сулит значительные преимущества, особенно для сценариев промышленной автоматизации, предоставляя мобильность компонентам системы, снижая затраты на развертывание и упрощая его по сравнению с исключительно проводными решениями [2].

Технология сетей, чувствительных ко времени (TSN), представляет собой набор стандартов, разработанных рабочей группой IEEE 802.1, с целью обеспечения детерминированной связи поверх стандартных сетей Ethernet [3]. Основная задача TSN – гарантировать минимальную задержку при передаче данных, обеспечить функционирование в режиме реального времени и высокую надежность, что критически важно для промышленных систем управления, автомобильных

сетей и других приложений, чувствительных ко времени. Важным аспектом TSN является возможность конвергенции трафика информационных технологий и операционных технологий в единой сети, что позволяет унифицировать сетевую инфраструктуру и снизить затраты.

Ключевые принципы, лежащие в основе TSN, реализуются посредством совокупности механизмов, определенных в различных стандартах IEEE 802.1.

Технология сетей, чувствительных ко времени (TSN), представляет собой набор стандартов, разработанных рабочей группой IEEE 802.1, с целью обеспечения детерминированной связи поверх стандартных сетей Ethernet [3]. Основная задача TSN – гарантировать минимальную задержку при передаче данных, обеспечить функционирование в режиме реального времени и высокую надежность. Важно отметить, что система 5G способна функционировать как совместимое с IEEE 802.1AS устройство, учитывающее время.

Для наглядного представления основных инструментов TSN ниже приведена Таблица 1 с ключевыми стандартами и их функциями.

ТАБЛИЦА 1. Ключевые стандарты IEEE 802.1 TSN и их функции

Стандарт	Название и основное назначение	Ключевые механизмы/Особенности
IEEE 802.1AS-2020	Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications (gPTP) / Синхронизация времени для приложений, чувствительных ко времени	Профиль IEEE 1588 (PTP), синхронизация с точностью до микросекунд, поддержка нескольких доменов времени, измерение задержек в коммутаторах и линиях связи [2]
IEEE 802.1Qbu	Frame Preemption / Вытеснение кадров	Определяет управление вытеснением на уровне моста, позволяет высокоприоритетным кадрам прерывать передачу низкоприоритетных [4]
IEEE 802.1CB	Frame Replication and Elimination for Reliability / Репликация и исключение кадров для обеспечения надежности	Дублирование кадров по нескольким путям для обеспечения бесшовного резервирования и защиты от сбоев узлов/линий [4]
IEEE 802.1Qav	Credit-Based Shaper -Усовершенствования пересылки и организации очередей для чувствительных ко времени потоков	Формирование трафика на основе кредитного механизма для сглаживания пульсаций и обеспечения зарезервированной полосы пропускания для потоков аудио/видео [4]
IEEE 802.1Qcc	Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements / Усовершенствования протокола резервирования потоков (SRP) и улучшение производительности	Улучшения SRP для крупномасштабных сетей, включая централизованную конфигурацию сети (CNC) для управления функциями TSN [2]

Системы 5G обладают встроенными механизмами синхронизации и способны поддерживать синхронизацию времени, совместимую с требованиями TSN. Базовые станции 5G gNB и компоненты опорной сети 5G Core обычно синхронизируются от высокоточных источников времени, таких как Глобальная навигационная спутниковая система GNSS [5].

Система 5G может интегрироваться с TSN в качестве логического моста TSN и функционировать как устройство, осведомленное о времени, совместимое со стандартом IEEE 802.1AS. Это означает, что 5GS способна передавать сообщения протокола gPTP между устройствами TSN, подключенными через сеть 5G, и участвовать в доменах синхронизации gPTP [6]. 5GS поддерживает различные режимы предоставления услуг синхронизации времени, включая режимы граничных часов Boundary Clock, сквозных прозрачных часов End-to-End Transparent Clock и одноранговых прозрачных часов Peer-to-Peer Transparent Clock [5]. Достижимая точность синхронизации между пользовательским оборудованием и gNB может составлять сотни наносекунд. Например, от 470 до 540 нс при определенной конфигурации радиоинтерфейса [7].

Промышленная автоматизация является одним из главных драйверов развития детерминированных сетей.

Бортовые сети автомобилей требуют детерминированной связи для функционирования критически важных с точки зрения безопасности систем, таких как усовершенствованные системы помощи водителю и системы электронного управления движением. Технология TSN находит применение для построения таких бортовых сетей [8]. Кроме того, связь типа «автомобиль – ко всему» на базе 5G URLLC способна повысить безопасность дорожного движения и обеспечить кооперативное автономное вождение, что также требует низких задержек и высокой надежности [9].

Профессиональное производство аудио- и видеоконтента, а также его трансляция, требуют синхронизированной передачи медиапотоков с низкой задержкой. Профили TSN, такие как Audio Video Bridging, определенные в стандарте IEEE 802.1BA, решают эти задачи в проводных студийных сетях [4]. Технология 5G способна расширить эти возможности, обеспечивая беспроводную передачу сигналов с камер, удаленное производство контента и его распространение, что требует высокой пропускной способности и синхронизированной доставки [10].

Приложения в сфере интеллектуальных энергосистем Smart Grid, автоматизации подстанций и релейной защиты нуждаются в точной синхрони-

зации времени и надежной связи для мониторинга и управления энергосистемами в режиме реального времени [3]. TSN может обеспечить необходимый детерминизм для критически важных коммуникаций в рамках энергетической инфраструктуры, в то время как 5G может предложить надежную связь на больших территориях для удаленного мониторинга и управления.

Современная практика развертывания сетей для критически важных приложений часто характеризуется использованием технологии TSN для обеспечения детерминизма в проводных сегментах и сетей 5G для удовлетворения потребностей в мобильной или беспроводной связи. Однако эти системы зачастую функционируют как отдельные, нескоординированные инфраструктуры.

Такое разделение порождает фундаментальное противоречие: приложения все чаще требуют бесшовной, сквозной детерминированной производительности в смешанных проводных и беспроводных доменах. Например, мобильный робот на заводе, подключенный по беспроводной сети, должен взаимодействовать с фиксированным оборудованием, подключенным через TSN с предсказуемыми задержками и надежностью. Раздельные решения с трудом справляются с обеспечением такого унифицированного уровня производительности. Передача управления handover между доменом TSN и обычной беспроводной сетью может вносить непредсказуемые задержки и приводить к деградации QoS, нарушая сквозной детерминизм [2]. Отсутствие конвергентной плоскости управления и контроля затрудняет оркестровку ресурсов, гарантирование QoS и поддержание согласованной синхронизации между этими различными сетевыми сегментами [11].

Исследования сосредоточены на решении ключевых проблем, возникающих при интеграции, таких как обеспечение сквозного качества обслуживания QoS, разработка механизмов пересылки трафика и планирование радиоресурсов 5G в режиме реального времени для потоков TSN с разнообразными временными требованиями [11]. В частности, предлагается концепция специализированного шлюза TSN-5G или «транслятора TSN», который должен выполнять функции сопряжения между двумя доменами и обеспечивать их бесшовное взаимодействие.

Еще одним важным направлением исследований является расширение функциональности TSN, в частности механизмов обеспечения надежности, на домен 5G. Примером может служить разработка фреймворка X-FRER, целью которого является реализация функциональности, аналогичной стан-

дарту IEEE 802.1CB Frame Replication and Elimination for Reliability, посредством многопутевой передачи данных в системе 5G[12].

В ходе анализа было выявлено практическое противоречие, заключающееся в том, что существующие раздельные, изолированные решения на базе технологий TSN и 5G не способны обеспечить требуемый уровень конвергенции и гарантировать сквозную производительность, необходимую для современных сложных приложений.

Проведенный обзор существующих научных исследований и разработок в области интеграции TSN и 5G, а также анализ усилий по стандартизации со стороны ведущих организаций (3GPP, IETF, IEC/IEEE) позволил выявить комплекс нерешенных проблем и открытых научных вопросов. Эти проблемы охватывают такие критические аспекты, как обеспечение сквозной синхронизации, согласованное управление качеством обслуживания, повышение надежности в гетерогенных средах и преодоление сложности управления конвергентными сетями.

На основе этого было сформулировано научное противоречие, состоящее в объективной недостаточности существующих теоретических и методических разработок для комплексного и системного решения задач интеграции технологий TSN и 5G.

Список используемых источников

1. 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications / 5G-ACIA White Paper. 2025. URL: https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/ (дата обращения: 12.01.2026).

2. Noor-A-Rahim M., Pesch D., Zanbouri, K. Comparative Performance Evaluation of 5G-TSN Applications in Indoor Factory Environments // arXiv:2501.12792v2 [cs.NI]. 2025. Accepted for IEEE WCNC 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2501.12792 (дата обращения: 12.01.2026).

3. Phoenix Contact. Time-Sensitive Networking (TSN) / Phoenix Contact. 2025. URL: https://www.phoenixcontact.com/ru-pc/tehnologii/kommunikacionnye-tehnologii/tsn (дата обращения: 12.01.2026).

4. Time-Sensitive Networking / Wikipedia. Обновлено 14.04.2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-Sensitive_Networking (дата обращения: 12.01.2026).

5. Atiq, M.K., Muzaffar R., Time synchronization for deterministic communication // arXiv:2401.10670v1 [cs.NI]. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2401.10670 (дата обращения: 12.01.2026).

6. Barbosa M., Dias K. L., Queiroz A., da Silva, M. V. B., A 5G-Edge Architecture for Computational Offloading of Computer Vision Applications // arXiv:2501.04267v1 [cs.NI]. 2025. Accepted at ICOIN 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2501.04267 (дата обращения: 12.01.2026).

7. Kolding T., Rost P.M., Performance of Integrated 3GPP 5G and IEEE TSN Networks // IEEE Communications Standards Magazine. 2022. June. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2000013. URL: https://www.researchgate.net/publication/362653466_Performance_of_Integrated_3GPP_5G_and_IEEE_TSN_Networks (дата обращения: 12.01.2026).

8. Aijaz A. 5G Replicates TSN: Extending IEEE 802.1CB Capabilities to Integrated 5G/TSN Systems / A. Aijaz // arXiv:2410.18739v1 [cs.NI]. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2410.18739 (дата обращения: 12.01.2026).

9. Hard Deadlines Research Articles R Discovery / Researcher Life. URL: https://discovery.researcher.life/topic/hard-deadline/10261335?page=1&topic_name=Hard %20Deadline (дата обращения: 12.01.2026).

10. Васин А. С., Елагин В. С., Анализ моделей управления сетевыми ресурсами в сетях 5G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 5. С. 32-41.

11. Satka Z. Real-time Communication in Integrated TSN-5G Networks: Doctoral Thesis / Z. Satka; Mälardalen University. 2025. URL: http://mdh.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2 %3A1946735 (дата обращения: 12.01.2026).

12. Герасимов А., Росляков А. Детерминированные сети связи и их стандартизация // Стандарты и качество. 2024. Июль. URL: https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=232562 (дата обращения: 12.01.2026).

FEATURES OF THE TSN PROTOCOL AND ITS APPLICATION IN MOBILE COMMUNICATION NETWORKS

Elagin V., Chitanava A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Time-Sensitive Networking (TSN), a set of IEEE 802.1 standards, is designed to enhance Ethernet technology by providing determinism, real-time capabilities, and increased reliability in wired networks. In the context of high data rates, ultra-low latency, and minimal jitter, the integration of 5G and TSN technologies is seen as a key development area, capable of providing comprehensive wireless support for Ethernet-TSN services.

Key words: 5G, TSN, network modeling, quality of service (QoS), time synchronization, traffic scheduling

УДК 621.382
ГРНТИ 49.46.29

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ШУМОВЫХ ДИОДОВ

А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, И. Л. Терех

Белорусская государственная академия связи

Измерение удельной теплоемкости жидкостей имеет особое значение в пищевой промышленности, поскольку позволяет точно рассчитывать количество теплоты, необходимое для обработки продуктов. Контроль этой величины необходим при проведении пастеризации, так как от нее зависят безопасность и качество пищевой продукции. Таким образом, целью исследования является оценка возможности использования шумовых диодов для измерения теплоемкости жидкостей.

удельная теплоемкость жидкости, шумовой диод, частота следования шумовых импульсов

Удельная теплоемкость продукта используется для расчета количества теплоты, необходимого для его нагрева до пастеризационной температуры, выбора оптимальных температурно-временных режимов, проектирования теплообменного оборудования и оптимизации энергетических затрат, а также для обеспечения безопасности и качества готовой продукции. Чем выше теплоемкость продукта, тем больше энергии и времени требуется для его нагрева. При неверном учете удельной теплоемкости возможен недостаточный нагрев продукта, приводящий к неполному уничтожению патогенной микрофлоры и снижению микробиологической безопасности, перегрев продукта, вызывающий ухудшение вкусовых качеств, изменение структуры и потерю пищевой ценности, неравномерное распределение температуры по объему продукта, что приводит к образованию холодных зон, увеличение энергетических затрат и снижение эффективности работы пастеризационного оборудования, сокращение срока хранения готовой продукции и повышение вероятности ее порчи [1].

Таким образом, точный учет удельной теплоемкости является необходимым условием для обеспечения надежности, экономичности и качества процессов пастеризации.

В качестве объекта исследований выступили шумовые диоды ND102L, ND103L и ND104L производства Республики Беларусь. В работах [2, 3] уже показана возможность их использования в системах контроля и измерения температуры. В работах [4, 5] установлено, что шумовые диоды имеют линейную зависимость напряжения пробоя от температуры, а также частоты следования шумовых импульсов от температуры при постоянном значении напряжения их обратного смещения.

Удельную теплоемкость жидкости $C_{уд}$ можно определить из выражения:

$$C_{уд} = \frac{Q}{m\Delta T},$$

где Q – количество теплоты, подводимое к нагревателю, m – масса жидкости, ΔT – интервал изменения температуры жидкости.

Количество теплоты, подводимое к нагревателю, можно определить как:

$$Q = IU\Delta t,$$

где I – электрический ток, протекающий через электрический нагреватель, U – напряжение, приложенное к электрическому нагревателю, Δt – интервал времени нагрева жидкости.

Тогда формулу для расчета удельной теплоемкости можно определить как:

$$C_{уд} = \frac{IU\Delta t}{m\Delta T}.$$

Согласно ранее проведенным исследованиям [3] при заданном напряжении обратного смещения и температуры T_1 формируются шумовые импульсы заданной частоты N_1. Увеличение температуры приводит к уменьшению частоты следования шумовых импульсов за время Δt и при некотором значении температуры T_2 величина частоты N_2 равно нулю.

Таким образом можно предложить метод измерения удельной теплоемкости жидкостей с помощью шумовых диодов, который заключается в следующем:

1. Емкость с жидкостью заданной массы m приводим в соприкосновение с шумовым диодом;

2. Определяем величину температуры T_1;

3. Устанавливаем напряжение питания шумового диода, превышающее напряжение пробоя, таким образом чтобы величина N_1 принимала максимальное значение в исследуемом диапазоне [3];

4. Нагреваем жидкость до температуры T_2 при которой N_2 равно нулю;

5. Измеряем величину Δt;

6. Рассчитываем величину удельной теплоемкости по представленной формуле.

Для оценки работоспособности предлагаемого метода определения удельной теплоемкости жидкостей были проведены экспериментальные исследования, а также выполнены расчеты данного параметра для всех используемых типов шумовых диодов. Каждая серия измерений повторялась пять раз, что позволило повысить статистическую надежность результатов и определить величину экспериментальной погрешности. Обработка полученных данных показала, что наибольшая точность измерений достигается при использовании шумового диода ND103L, для которого относительная погрешность не превышает 5 %, что подтверждает эффективность и надежность предлагаемого метода. Для диодов моделей ND102L и ND104L величина погрешности составила 7 % и 8 % соответственно.

Для проведения исследования были отобраны пять видов жидкостей, наиболее употребляемых в пищевой промышленности. Это вода, молоко (2,6 % жирности), кефир (3,2 % жирности) солевой и сахарный раствор по 20 % каждый. Установлено, что интервал времени Δt, за который частота следования шумовых импульсов уменьшается до нуля, является индивидуальным для каждой жидкости и определяется ее удельной теплоемкостью. Интервал времени Δt составил 81, 86, 88, 66 и 78 с для воды, молока (2,6 % жирности), кефира (3,2 % жирности) солевого раствора (концентрация 20 %) и сахарный раствор (концентрация 20 %) соответственно. Полученные при расчете значения удельной теплоемкости составили 4175,2, 3804,9, 3665,9, 3438,1 и 3611,1 Дж/(кг·К) для воды, молока (2,6 % жирности), кефира (3,2 % жирности) солевого раствора (концентрация 20 %) и сахарный раствор (концентрация 20 %) соответственно.

Экспериментальные значения были сопоставлены со справочными данными. Анализ результатов показывает, что расхождение между измеренными и табличными значениями не превышает 0,19 %, что свидетельствует о высокой точности метода измерений.

Таким образом, предложенный метод позволяет не только измерять удельную теплоемкость, но и идентифицировать тип жидкости по динамике изменения частоты шумовых импульсов.

Список используемых источников

1. Технология обработки, хранения и производства продуктов питания из сырья животного происхождения: учебно-методическое пособие / И. А. Прокопенко; Севастопольский государственный университет, Политехнический институт. Севастополь: СевГУ, 2023. 215 с.

2. Зеневич А. О., Кочергина О. В. Шумовой диод как основа для создания сигнализатора температуры // Прикладная физика. 2024. № 5. С. 73-79.

3. Зеневич А. О., Кочергина О. В. Шумовой диод как основа для создания термоанемометров // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 11. С. 1094–1100.

4. On the Temperature Characteristics of Noise Diodes / A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, V. V. Buslyuk, D. N. Fedosyuk and D. A. Lushchy //Semiconductors, 2024, Vol. 58. № 13. PP. 80–83.

5. Исследование зависимости амплитудных характеристик шумовых диодов от температуры / Зеневич А. О., Кочергина О. В., Буслюк В. В., Федосюк Д. Н., Лущий Д. А. // Изв. вузов. Электроника. 2025. Т. 30. № 1. С. 32-39.

MEASURING THE SPECIFIC HEAT CAPACITY OF LIQUIDS USING NOISE DIODES

Zenevich A., Kochergina O., Terekh I.
Belarusian State Academy of Telecommunications

Measuring the specific heat capacity of liquids is of particular importance in the food industry, as it allows for the precise calculation of the amount of heat required to process products. Monitoring this parameter is essential during pasteurization, as it directly affects the safety and quality of food products. Therefore, the aim of this study is to evaluate the feasibility of using noise diodes for measuring the heat capacity of liquids.

Key words: specific heat capacity of a liquid, noise diode, noise pulse repetition rate

УДК 535
ГРНТИ 49.37.31

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИРОДНОГО МОНИТОРИНГА

А. Ю. Игуменов[1,2], И. В. Мельников[1], В. А. Соколов[1]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
[2]ООО «Т8»

Представлена концепция автономного многофункционального комплекса природного мониторинга, разрабатываемого в МФТИ. Комплекс представляет собой абонентское устройство, работающее круглый год автономно. Устройство оснащено экодатчиками и волоконно-оптическими датчиками, интегрированными в одну систему. Сбор и обработка данных проводится дистанционно.

природный мониторинг, волоконно-оптические датчики, волоконно-оптические брэгговские решетки

Введение

Мониторинг основных параметров почвы – температуры, влажности и кислотности (pH) – является фундаментальной основой для перехода агропромышленного комплекса (АПК) на рельсы точного земледелия и устойчивого развития. Эти три показателя выступают ключевыми детерминантами почвенного плодородия, определяя эффективность использования ресурсов, здоровье растений и, в конечном итоге, рентабельность сельскохозяйственного производства. Температурный режим почвы играет первостепенную роль в регуляции скорости биохимических и физических процессов. Он напрямую влияет на прорастание семян, развитие корневой системы и микробиологическую активность, от которой зависит разложение органического вещества и доступность элементов питания. Влажность почвы является критическим фактором, лимитирующим урожайность в зонах как недостаточного, так и избыточного увлажнения. Данные о влажности необходимы для научно обоснованного планирования ирригационных мероприятий. Внедрение систем прецизионного орошения на основе данных с датчиков влажности позволяет сократить потребление воды до 50 % по сравнению с традиционными методами, одновременно повышая урожайность на 10-15 % за счет поддержания оптимального водного баланса для растений. Кислотность почвы (pH) служит интегральным показателем ее химического состояния и доступности макро- и микроэлементов. Отклонение pH от оптимальных для данной культуры значений может приводить, например, к угнетению роста из-за токсичности ионов алюминия или марганца,

а также к блокировке усвоения таких ключевых элементов, как фосфор, калий, магний и цинк. Игнорирование пространственной неоднородности pH внутри поля ведет к неэффективному использованию удобрений. Точный мониторинг кислотности с построением детализированных карт позволяет проводить дифференцированное известкование и вносить удобрения только там, где это действительно необходимо, учитывая даже микро- и мезорельеф местности. Такой подход, реализуемый в рамках точного земледелия, позволяет снизить затраты на химикаты на 20-30 % и повысить урожайность на 15-40 % за счет устранения реального, а не предполагаемого дефицита элементов.

Таким образом, интеграция данных непрерывного мониторинга температуры, влажности и кислотности в единую систему поддержки принятия решений трансформирует сельское хозяйство из эмпирического в высокотехнологичное, управляемое на основе точных данных. Это позволит не только максимизировать отдачу от каждого гектара и каждой единицы вложенных ресурсов, но и минимизировать экологическую нагрузку на агроландшафты, обеспечивая долгосрочное сохранение почвенного плодородия.

Данная статья посвящена концепции разрабатываемого в МФТИ автономного многофункционального комплекса природного мониторинга. Он представляет собой абонентское устройство, оснащенное экодатчиками и волоконно-оптическими датчиками, интегрированными в одну систему.

Архитектура и конструкция комплекса природного мониторинга

На рис. 1 представлена блок-схема комплекса природного мониторинга.

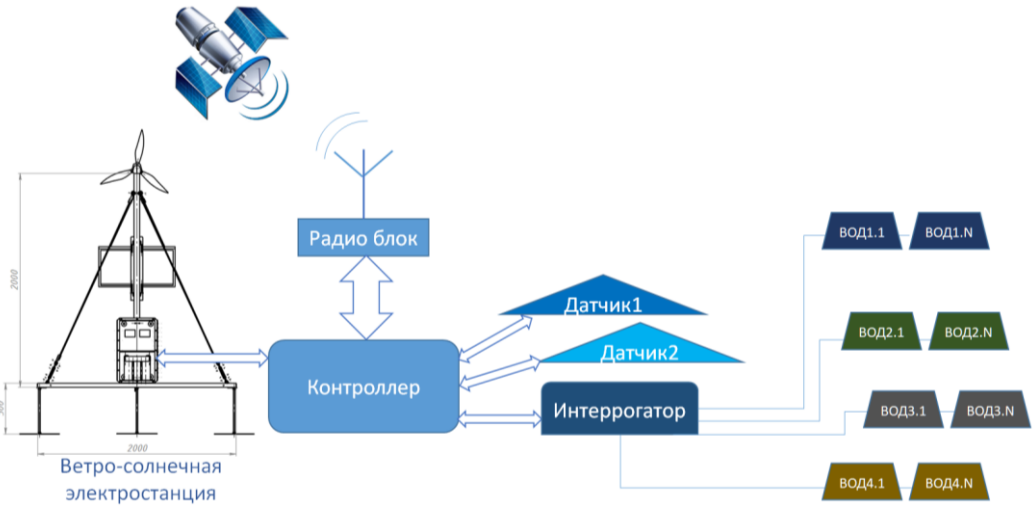


Рис. 1. Блок-схема комплекса природного мониторинга

Электропитание комплекса обеспечивается ветро-солнечной электростанцией, а также встроенным аккумулятором. Контроллер управляет датчиками разных типов и интеррогатором, обеспечивающим опрос волоконно-оптических датчиков. Передача данных осуществляется по радиоканалу.

Таким образом, разрабатываемый аппаратно-программный комплекс мониторинга состояния почвы имеет следующие особенности:

– автономный и автоматический сбор данных с датчиков разного типа о температуре, влажности и кислотности почвы;
– распределенные волоконно-оптические высокоточные и коррозионно-стойких сенсорные сети для одновременного измерения влажности, температуры, химического состава и прочих величин в режиме близкому к реальному времени;
– отправка данных по радиоканалу с модуляцией LoRa, позволяющая функционировать в рамках сети «Интернета вещей» (IoT);
– возможность работы с перспективными информационными сетями на базе космических аппаратов на низкой круговой околоземной орбите.

Существенным преимуществом разрабатываемого комплекса является его оснащение системой волоконно-оптических датчиков (ВОД). ВОД занимают ключевое место в измерении физических и физико-химических параметров благодаря таким преимуществам, как электромагнитная невосприимчивость, высокая чувствительность, малые габариты, возможности мультиплексирования и удаленного мониторинга. Наиболее распространены датчики на основе волоконных брэгговских решеток (Fiber Bragg Grating, FBG, ВБР) [1–4] и датчики на эффекте многомодовой интерференции в структурах одномодовое-многомодовое-одномодовое волокно (SinglemodeMultimode-Singlemode, SMS) [5–10]. ВБР обеспечивают высокую точность, стабильность и воспроизводимость параметров, что критично для промышленных систем. ВБР-датчики, как правило, используют спектральную демодуляцию с применением оптических анализаторов спектра или специализированных ВБР-интеррогаторов, обеспечивающих разрешение на уровне пикометров по длине волны. Это позволяет реализовывать плотное спектральное мультиплексирование большого числа датчиков (один интеррогатор способен опрашивать порядка 160 датчиков).

Волоконно-оптическая система мониторинга

Для системы распределенного мониторинга температуры почвы выбраны волоконно-оптические датчики на брэгговских решетках (ВБР). Такие датчики обеспечивают высокую точность измерений за счет анализа спектральных сдвигов оптического сигнала. Главные преимущества: полная невосприимчивость к электромагнитным помехам, коррозионная стойкость и возможность работы в агрессивных средах. Технология позволяет размещать множество датчиков на одном волокне, что идеально подходит для построения распределенных систем сбора данных. На рис. 2. приведена схема системы мониторинга температуры на основе ВБР.

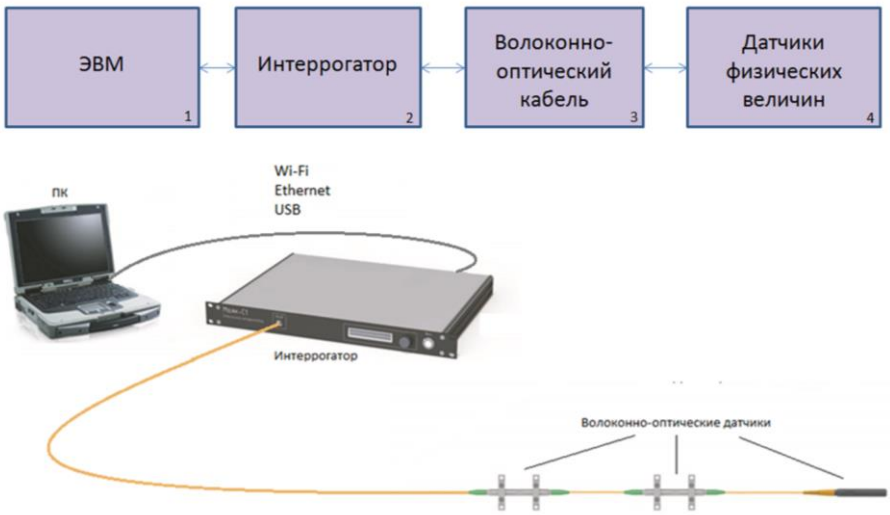


Рис. 2. Схема волоконно-оптической системы мониторинга температуры на основе ВБР

Рассматриваемая система мониторинга обладает рядом существенных достоинств, определяющих ее применимость для широкого круга задач. Прежде всего, стоит отметить способность проводить измерения параметров объекта в экстремально широком диапазоне расстояний – от одного метра до пятидесяти километров. Принципиально важным является то, что на всем протяжении этого диапазона заявленная точность измерений не снижается. Это достигается за счет специальных методов передачи и обработки сигнала.

В части сбора данных система демонстрирует высокую масштабируемость. Она способна опрашивать от одного до тысячи датчиков в одном канале (максимум 16 каналов), предназначенных для контроля различных физических величин. Гибкость системы подчеркивается возможностью регулировки частоты опроса в диапазоне от 0,1 до 100 Гц, что позволяет настраивать режим сбора информации в зависимости от динамики наблю-

даемого процесса. Измерение разнородных параметров может производиться практически одновременно благодаря последовательному подключению датчиков, что оптимизирует процесс коммутации. Кроме того, архитектурные решения позволяют разворачивать на базе системы распределенные сети мониторинга, стекающиеся в единый центр обработки данных, что критически важно для контроля территориально распределенных объектов.

Основным ограничивающим фактором является сложность развертывания кабельной инфраструктуры. Для обеспечения связи на больших расстояниях и подключения многочисленных датчиков требуется тщательное проектирование трасс и проведение масштабных монтажных работ. Вторым важным аспектом выступают повышенные эксплуатационные требования к аппаратной части. Оборудование должно сохранять стабильность работы в условиях перепадов температур и других внешних воздействий.

Заключение

Рассмотрен комплекс мониторинга параметров почвы на основе эко-датчиков и волоконно-оптических датчиков, интегрированных в одну систему. Датчики объединены в одно абонентское устройство, работающее круглый год автономно, сбор и обработка данных проводится дистанционно. Волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решеток обеспечивают точечное измерение температуры и других параметров почвы на площади более 100 квадратных километров. Опрос датчиков производится многоканальным интеррогатором.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда НТИ в рамках Договора № 70-2025-000804 от 26.05.2025.

Список используемых источников

1. Li R., Chen Y., Tan Y., Zhou Z., Li T., Mao J. Enhancement of FBG-Based Strain Sensor Sensitivity // Sensors. 2018. V. 18, 1607.

2. Jasjot S., Neena G., Divya D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review // Optical Engineering. 2020. V. 59. 1.

3. Augustine N. L., Chen M.-Y., Hind H. Polymer optical fiber and fiber Bragg grating sensors for biomedical engineering Applications: A comprehensive review // Optics Laser Technology. 2023. V. 170.

4. Xuekai G., Tigang N., Chuanbiao Z., Jian X., Jingjing Z., Heng L., Jing L., Li P., Haidong Y. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing // Optics Communications. 2019. V. 454. 124441.

5. Arifin A., Hatta A. M., Sekartedjo, Muntini M. S., And Rubiyanto A. Long-Range Displacement Sensor Based on SMS Fiber Structure and OTDR // Photonic Sensors. 2015. V. 5. № 2. 166–171.

6. Guzman-Sepulveda J.R., Guzman-Cabrera R., Castillo-Guzman A.A. Optical Sensing Using Fiber–Optic Multimode Interference Devices: A Review of Nonconventional Sensing Schemes // Sensors. 2021. V. 21, № 5.

7. Wang K., Dong X., Kohler M.H., Kienle P., Bian Q., Jacobi M., Koch A.W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): a review // IEEE Sensors journal 2021. V. 21. № 1. P. 132-142.

8. Игуменов А. Ю., Боголюбова Е. В., Горбашова М. А., Чебыкин И. П. Оптические волокна: физические основы и практические применения: учебное пособие. М.: МФТИ, 2023. 76 с.

9. Игуменов А. Ю., Мельников И. В., Афанасьев А. А., Попова С. С., Лукиных С. Н., Тамбасов И. А. Рефлектометрическое измерение температуры с использованием оптоволоконной структуры «одномод–многомод–одномод» // ЖТФ. 2022. Т. 48, № 17. С. 17–19.

10. Игуменов А. Ю., Мусин Р. Д., Надеждин Е. Р., Мельников И. В., Ковалев А. Н., Голышев И. В., Дубиня Н. В. Датчик изгибных деформаций на основе волоконно-оптической SMS-структуры // Труды МФТИ. 2025. Т. 17. № 3. С. 159-170.

MULTIFUNCTIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING COMPLEX

Igumenov Yu.[1, 2], Melnikov I.[1], Sokolov V.[1]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
[2] T8 LLC

The concept of an autonomous multifunctional environmental monitoring complex, developed at MIPT, is presented. The system consists of a subscriber unit that operates autonomously year-round. It is equipped with environmental sensors and fiber-optic sensors integrated into a single system. Data collection and processing are performed remotely.

Key words: environmental monitoring, fiber optic sensors, fiber optic Bragg gratings

УДК 621.391.1
ГРНТИ 49.44.29

ПРИМЕНЕНИЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ НА МУЛЬТИПЛЕКСОРЕ OTN

А. К. Канаев, Ф. А. Прошин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

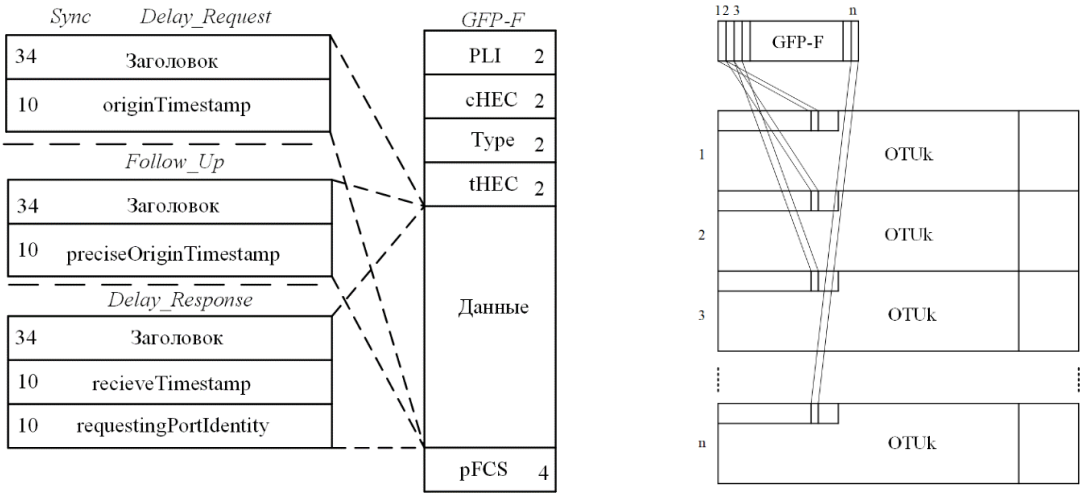
Целью работы является разработка модели синхронизации шкалы времени, организованной на мультиплексоре OTN, с использованием пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора) и его модификаций в качестве механизма корректировки, а также исследование влияния настроек регулятора на достигаемую точность и стабильность синхронизации. Применен метод имитационного моделирования на основе агентного подхода. По результатам моделирования показан положительный эффект от применения ПИД-регулятора в составе сети синхронизации OTN. Полученные результаты расширяют теоретическую базу в области синхронизации телекоммуникационных сетей, в частности, организованных на базе OTN, а также будут полезны при проектировании новых и модернизации действующих сетей транспортного уровня при расчете оптимальных параметров с учетом различных условий функционирования сетевого оборудования.

оптическая транспортная сеть, сетевая синхронизация, PTP-серво, ПИД-регулятор

Формирование сети синхронизации на уровне OTN требует разработки соответствующих аппаратных средств, которые реализуют функции частотно-временного обеспечения с доступом к цифровой структуре данных, в частности к оптическим транспортным блокам порядка *k* (Optical transport unit level k, OTUk). Более подробное описание архитектуры и методики формирования сети синхронизации дано в работе [1]. Цель данной статьи заключается в разработке модели процесса переноса сообщений протокола точного времени (Precision time protocol, PTP) через заголовок OTUk – канал сообщений синхронизации OTN (OTN synchronization message channel, OSMC), которая позволяет выбирать тип используемого механизма корректировки: ПИД регулятор и его модификации – пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ) регуляторы.

Процесс переноса сообщений PTP в структуре OTU показан на рисунке 1. Первоначально сообщение PTP размещается в единице данных, получаемой в соответствии с общей процедурой формирования кадра с сохранением структуры данных (Generic framing procedure Framed, GFP-F) [2, 3, 4].

Далее выполняется побайтовое разбиение сформированного блока GFP-F и вставка каждого байта в OSMC. Следовательно, для передачи одного блока GFP-F длиной *N* потребуется последовательность из *N* блоков OTUk.



а) б)

Рис. 1. Последовательное размещение: а) сообщений PTP в блоках GFP-F; б) блока GFP-F в структуре данных OTN

Определим время, которое потребуется для передачи одного блока GFP-F по формуле (1):

$$T_{GFP} = \frac{N_{GFP} \times 8}{B_{OSMC} \times 1000}, \quad (1)$$

где N_{GFP} – длина блока GFP-F (байт), B_{OSMC} (Кбит/с) – пропускная способность OSMC.

При этом длина GFP-F определяется в зависимости от типа передаваемого сообщения PTP по формуле (2):

$$N_{GFP} = N_{PTP} + N_{\text{сл}}, \quad (2)$$

где N_{PTP} – длина сообщения PTP (байт), $N_{\text{сл}}$ – количество служебных байтов.

Результаты расчетов для различных типов сообщений и скоростей OTUk в соответствии с Рек. МСЭ-Т G.709 [5] приводятся в таблице 1.

При построении имитационной модели процесса синхронизации в среде AnyLogic будем считать, что сообщение PTP представляет собой агента, который обслуживается различными подпроцессами при последовательном размещении, передаче и выделении из цифровой структуры OTN. Разработанная модель приведена на рисунке 2, в качестве исходных данных приняты параметры согласно произведенным расчетам с учетом данных, приведенных в работе [6].

ТАБЛИЦА 1. Значения задержки передачи блоков GFP-F с нагрузкой PTP

Порядок OTUk	Задержка в зависимости от типа сообщения PTP, мкс*			
	Sync(56)	Follow_Up(56)	Delay_Reques(56)t	DelayResponse(66)
k=1	2742,393			3232,106
k=2	682,716			804,629
k=3	169,959			200,309
k=4	65,391			77,068

Примечание – в скобках после типа сообщения PTP указана длина GFP-F в байтах

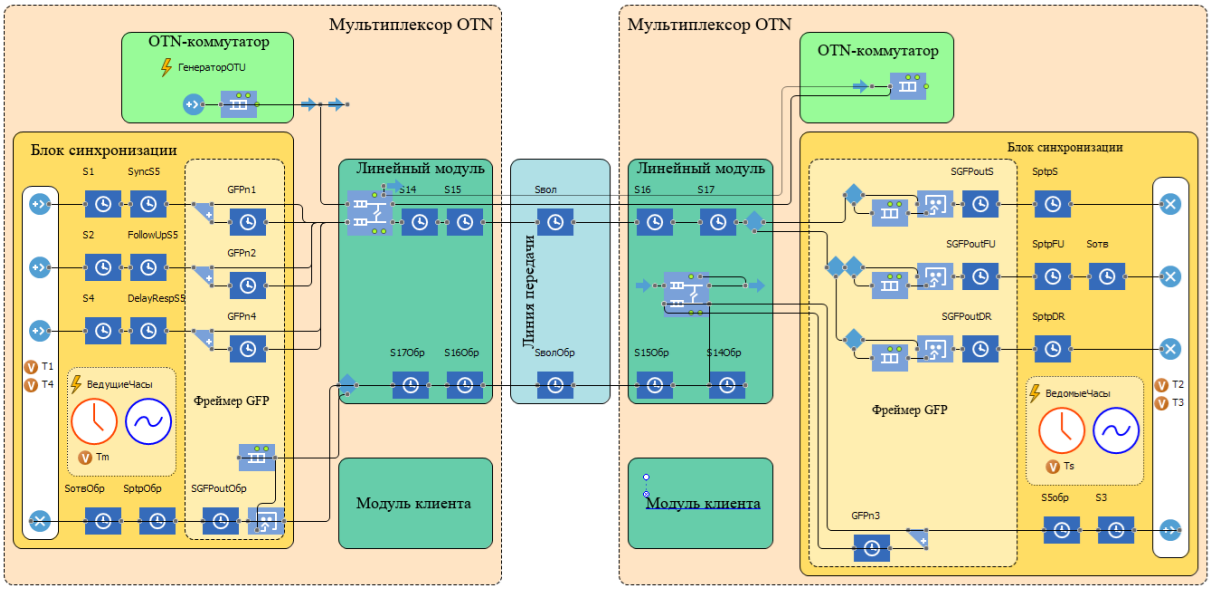


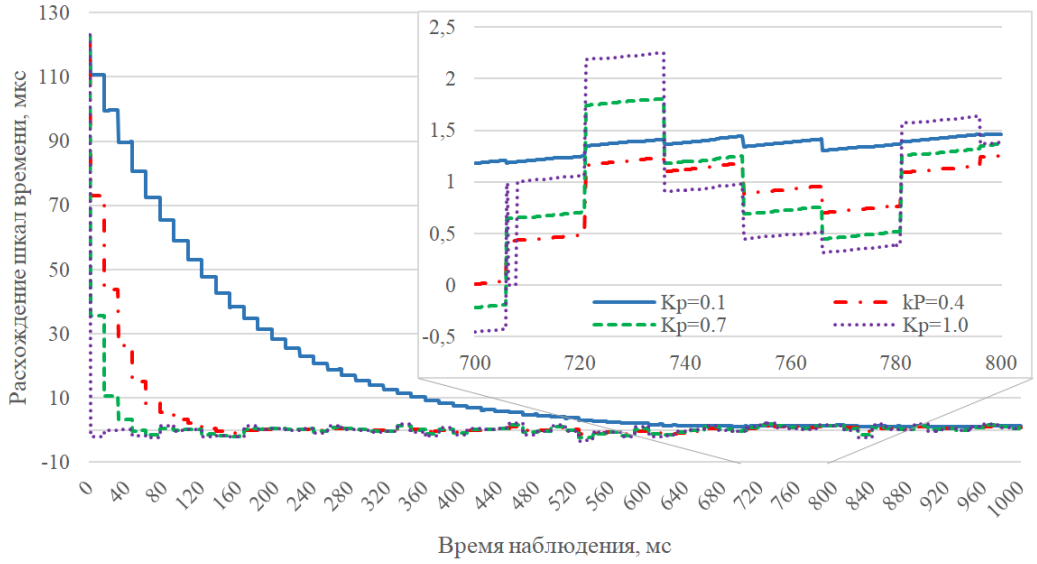
Рис. 2. Разработанная имитационная модель процесса синхронизации шкалы времени

Так как при реализации PTP важная составляющая – это механизм корректировки (PTP-серво) [7], то в данной модели реализована функциональность ПИД-регулятора и его модификаций. Последовательность произведенных опытов дана в таблице 2.

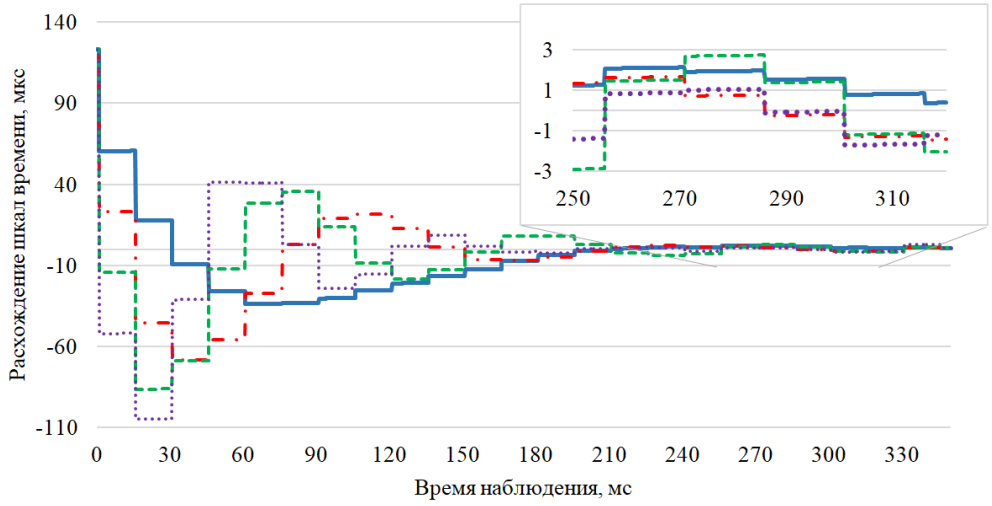
ТАБЛИЦА 2. Параметры П-, ПИ-, ПИД-регулятора при моделировании

Параметр	Значение параметров при проведении экспериментов		
	П-регулятор	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
Kp	0,1; 0,4; 0,7; 1,0	0,4	0,4
Ki	–	0,1; 0,4; 0,7; 1,0	0,1
Kd	–	–	0,1; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75; 0,8

а)



б)



в)

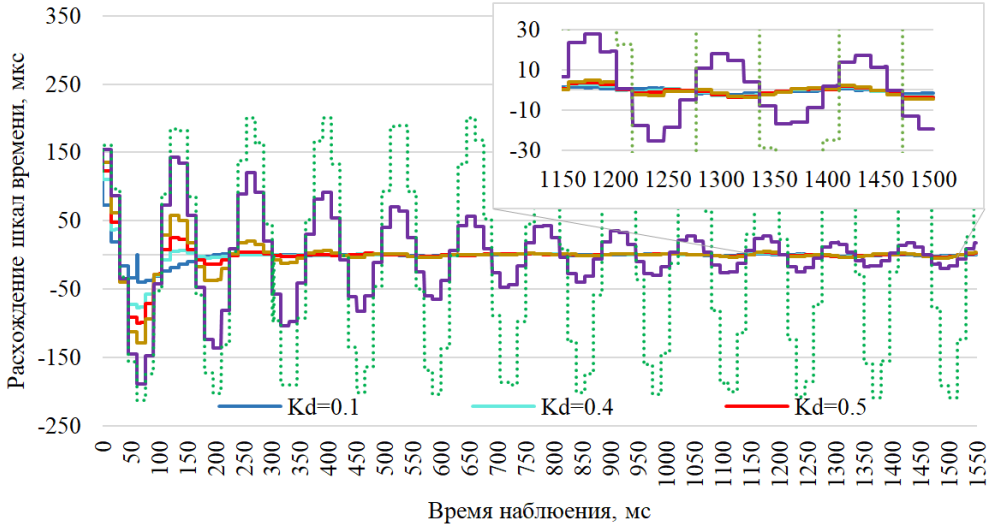


Рис. 3. Расхождение шкал времени при изменении составляющих K_p (а), K_i (б), K_d (в)

По результатам проведенных серий экспериментов получены данные, представленные на графиках 3*а*, 3*б*, 3*в* для П-, ПИ-, ПИД-регулятора, соответственно. Учет только пропорциональной составляющей (П) позволяет исключить скачкообразное изменение фазы, что немаловажно при синхронизации времени. Наиболее плавная корректировка наблюдается при меньших значениях K_p, но следует понимать, что PTP при реализации через OSMC требует значительно большего времени на каждый цикл обмена сообщениями и, соответственно, большего времени сходимости. Кроме того, присутствующая статическая ошибка будет достигать единиц микросекунд, что не удовлетворяет потребностям части потребителей синхронизации [1].

Добавление интегральной составляющей значительно сокращает время, необходимое для синхронизации (до ~190 мс) и позволяет практически убрать статическую ошибку, что является необходимым условием достижения точной синхронизации. Изменение коэффициента в большую сторону сокращает время сходимости, но вызывает более значительные изменения, что нежелательно в отношении синхронизации шкалы.

Использование ПИД-регулятора позволяет, с одной стороны, обеспечить синхронизацию при времени сходимости 450–500 мс (K_d = 0,1…0,6), но при дальнейшем увеличении время сходимости значительно возрастает (более 1,5 с), а также наблюдается рассогласование системы и выход из состояния синхронизации, что неприемлемо.

Таким образом, использование ПИД-регулятора в качестве механизма корректировки шкалы времени при реализации сети синхронизации в OTN показывает достаточно высокие результаты. На основании проделанных опытов можно сказать, что реализация ПИ-регулятора удовлетворяет требованиям с точки зрения параметров синхронизации, обеспечивая оптимальное время сходимости (200 мс) и достаточно высокую точность в пределах единиц микросекунд. Применение П-регулятора нецелесообразно в связи с наличием статической ошибки, что в результате означает постоянное отставание (опережение) локальной шкалы времени и, следовательно, отсутствие синхронизации. Добавление дифференциальной составляющей в OTN не требуется, так как технология OTN не предполагает резких колебаний задержки, на основании которой определяется сдвиг часов, а следовательно – нет необходимости увеличивать ее быстродействие. При этом при неправильной настройке возникает рассинхронизация и колебания выводят часы из состояния устойчивой синхронизации. Актуальной задачей является дальнейший подбор коэффициентов K_p, K_i, при которых обеспечивается эф-

фективная корректировка шкалы времени, организованной на мультиплексоре OTN.

Список используемых источников

1. Прошин Ф. А. Методика и модели формирования сети синхронизации в оптических транспортных сетях со спектральным разделением каналов: дис. канд. техн. наук: 2.2.15 / Прошин Федор Алексеевич. Санкт-Петербург, 2025. 173 с.

2. ITU-T Rec. G.7041/Y.1303 (08/2016). Generic framing procedure. Geneva: ITU, 2017. 80 p.

3. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Amendment 1: Precision Time Protocol (PTP) Mapping for Transport over the Optical Transport Network (OTN) in IEEE 1588b-2022. New York, NY, USA: IEEE Inc., 2022. 499 p.

4. ITU-T Recommendation G.8275.1/Y.1369.1 (11/2022). Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network – Geneva: ITU, 2023. 68 p.

5. ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 (06/2020)/ Interfaces for the optical transport network (OTN) – Geneva: International Telecommunication Union, 2020. 269 p.

6. Моделирование процесса обработки меток времени на устройствах транспортной сети / А. К. Канаев, Е. В. Казакевич, М. А. Сахарова, Ф. А. Прошин // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 2. С. 34-47. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47. EDN: JCNBES.

7. Giorgi G. Modeling and Simulation Analysis of PTP Clock Servo / G. Giorgi, C. Narduzzi // 2007 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, Vienna, Austria, 2007. PP. 155-161. DOI: 10.1109/ISPCS.2007.4383791.

IMPLEMENTING THE PID CONTROLLER FOR CLOCK SYNCHRONIZATION THROUGH OTN MULTIPLEXER

Kanaev A., Proshin F.
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

The purpose of this work is to develop a model of synchronization of OTN multiplexer timescale using proportional-integral-derivative controller (PID controller) and its modifications as a clock servo and to analyze the impact of its parameters on precision and stability of synchronization. The agent-based method of simulation modeling is applied. As a result, a positive effect of PID controller implementing is demonstrated. These results spread the theoretical base of telecommunication network synchronization including OTN networks and can be useful in designing the new ones and modernization of current transport networks for computation of the optimal parameters taking into account different conditions of network equipment functioning.

Key word: optical transport network, network synchronization, PTP-servo, PID controller

УДК 534.2
ГРНТИ 49.03.05

ОЦЕНКА ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА АКУСТИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

А. В. Качнов, Д. Перес-Кальдерон

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Работа посвящена выводу аналитического выражения и анализу импульсной характеристики беспроводного канала акустического трансформатора. На основе аппарата линейных систем и ранее полученных частотных зависимостей выводятся строгие выражения для двух моделей: прямого канала и канала с учетом многократных переотражений от границ барьера. Показано, что учет переотражений приводит к формированию импульсной характеристики в виде затухающей последовательности дискретных отсчетов, временные задержки и амплитуды которых аналитически связаны с геометрическими и акустическими параметрами барьера. Полученные результаты создают основу для синтеза оптимальных эквалайзеров и выбора корректирующих кодов, позволяющих компенсировать межсимвольную интерференцию и повысить пропускную способность канала связи акустического трансформатора.

импульсная характеристика, акустический трансформатор, ультразвуковая связь, переотражения, обработка сигналов, структурно-неоднородный канал

Беспроводная передача информации из электромагнитно изолированных объемов представляет значительный практический интерес для задач мониторинга и управления в герметичных объемах, взрывоопасных средах и конструкциях [1]. Одним из вариантов реализации такой системы является использование акустического трансформатора, в котором носителем информации является ультразвуковая волна, распространяющаяся в толще материала барьера [2, 3].

Фундаментальный этапом работы такой системы является разработка математической модели канала связи, который бы учитывал влияние параметров барьера на процесс передачи информации. В предыдущей работе [4] авторами было проведено моделирование амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик ультразвукового тракта и проанализировано влияние многократных переотражений на форму АЧХ. Однако, для полного описания канала связи и, в частности, для оценки временных искажений и межсимвольной интерференции необходимо знание импульсной характеристики (ИХ).

Таким образом, целью настоящей работы является завершение описания ультразвукового тракта акустического трансформатора путем вывода

аналитических выражений для ИХ и последующего анализа ее свойств. Научная новизна исследования заключается в переходе от частотного описания канала к временному с явным учетом структуры переотражений, что позволяет качественно и количественно оценить временные задержки и амплитуды многолучевых компонент.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. На основании установленных в [4,5] зависимостей АЧХ и ФЧХ получить аналитическое выражение для ИХ модели прямого канала без учета переотражений.

2. Обобщить результат для аналитического выражения ИХ модели канала с многократными переотражениями.

3. Провести параметрический анализ полученных выражений ИХ в зависимости от геометрических размеров и акустических свойств барьера.

Исходными данными для вывода импульсной характеристики служат аналитические выражения для коэффициента передачи, полученные в работе [4, 5]. Переход к временной области осуществляется путем применения обратного преобразования Фурье к передаточной функции канала $H(j\omega)$. Численное моделирование проводилось в среде MATLAB с использованием параметров, указанных в табл.1.

Введем следующие обозначения:

α – коэффициент затухания ультразвука в материале барьера, [Нп/м];

V – коэффициент отражения от границ барьера;

d – толщина барьера, [м];

c – скорость звука в материале барьера, [м/с];

$k = \omega/c$ – волновое число, [$м^{-1}$];

$\tau_0 = d/c$ – время задержки первого сигнала, [с].

1. Модель прямого канала

Передаточная функция прямого канала [5] описывается с помощью выражения (1):

$$H_1(\omega) = e^{-\alpha d} e^{jkd} = e^{-\alpha d} e^{j\omega\tau_0}. \qquad (1)$$

После применения обратного преобразования Фурье к выражению (1) ИХ прямого канала передачи без учета переотражений будет иметь следующий вид:

$$h_1(t) = e^{-\alpha d}\delta\left(t - {}^{d}/_{c}\right) = e^{-\alpha d}\delta(t - \tau_0). \qquad (2)$$

2. Модель канала с учетом многократных переотражений

После прохождения сигнала в прямом направлении, часть сигнала выйдет за границы, а часть сигнала, ослабленного в V раз, отразится от нижней грани обратно в толщу барьера ввиду разницы акустических сопротивлений. Аналогичный процесс будет повторяться для верхней грани. Схематичное представление процесса переотражений показано на рис. 1.

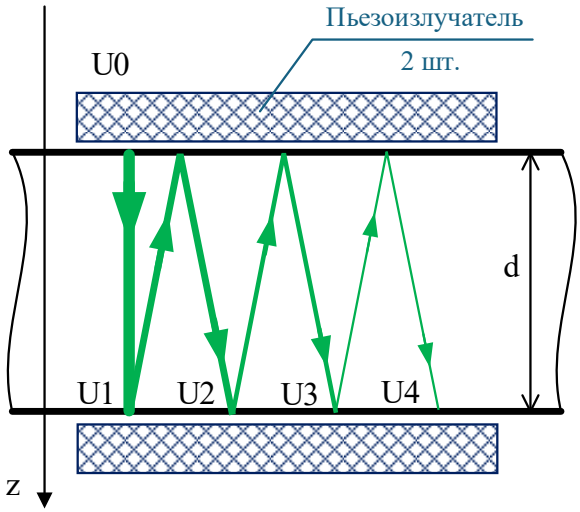


Рис. 1. Многократные переотражения

Исходя из вышесказанного принимаемый сигнал будет определяться как сумма прямого и отраженных сигналов:

$$U_{\text{прием}} = U_1 + U_2 + \cdots + U_n + \cdots, \quad (3)$$

Очевидно, что каждое переотражение в выражении (3) можно рассматривать как прохождение сигнала в прямом направлении для канала толщиной $(2n+1)d$, где n – номер переотражения. Амплитуда такого эхо-сигнала будет уменьшена в V^{2n} раз. Таким образом суммарная передаточная функция канала с многократными переотражениями может быть представлена в виде суперпозиции передаточных функций каждого отдельного переотражения:

$$H_2(\omega) = e^{-\alpha d}e^{jkd} + V^2e^{-3\alpha d}e^{3jkd} + V^4e^{-5\alpha d}e^{5jkd} + \cdots \quad (4)$$

Импульсная характеристика канала с переотражениями определяется применением обратного преобразования Фурье к выражению (4). С учетом того факта, что преобразование суммы равно сумме преобразований, ИХ канала будет представлять собой бесконечный ряд задержанных и взвешенных дельта-функций. Окончательная аналитическая форма ИХ канала с многократными переотражениями принимает вид:

$$h_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} V^{2n} \cdot e^{-(2n+1)\alpha d} \cdot \delta\left(t - (2n+1)\,{}^{d}/_{c}\right) \quad (5)$$

3. Исходные данные для моделирования

Для моделирования характеристик канала будем использовать параметры, указанные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Численные значения параметров моделирования

Параметр	Ед. измерений	Алюминий	Сплав АМГ6	Сталь	Титан
Скорость звука, с	м/с	6 300	5 300	5 900	6 100
Коэффициент затухания, α	Нп/м	2.3	3.5	2.3	2.9

4. Результаты моделирования

На первом этапе был проведен расчет амплитуд эхо-сигналов для разных значений коэффициента отражения *V*. Случай $V = 0.9$ соответствует случаю отсутствия согласования импедансов барьера и внешней среды, например, граница «метал-воздух», случай $V = 0.1$ соответствует случаю согласования акустических импедансов барьера и внешней среды, например, граница «метал-пьезоизлучатель». Результаты моделирования представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Амплитуды эхо-сигналов для различных материалов

Материал	d, мм	V	Номер эхо-сигнала				
			0	1	2	3	4
Алюминий	10	0.1	0.9773	0.0093	0.0001	0.0000	0.0000
		0.2	0.9773	0.0373	0.0014	0.0001	0.0000
		0.3	0.9773	0.0840	0.0072	0.0006	0.0001
		0.4	0.9773	0.1493	0.0228	0.0035	0.0005
		0.5	0.9773	0.2333	0.0557	0.0133	0.0032
		0.6	0.9773	0.3360	0.1155	0.0397	0.0137
		0.7	0.9773	0.4573	0.2140	0.1002	0.0469
		0.8	0.9773	0.5973	0.3651	0.2232	0.1364
		0.9	0.9773	0.7560	0.5848	0.4524	0.3500

На втором этапе было рассчитано время задержки канала для различных материалов и разных толщин барьера. Результаты моделирования представлены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Время задержки первого импульса в барьере

Толщина барьера, d, мм	Время задержки первого импульса, мкс			
	Алюминий	Сплав АМГ6	Сталь	Титан
10	1.6	1.9	1.7	1.6
20	3.2	3.8	3.4	3.3
30	4.8	5.7	5.1	4.9
40	6.3	7.5	6.8	6.6
50	7.9	9.4	8.5	8.2
100	15.9	18.9	16.9	16.4

5. Выводы

На основе аналитического моделирования получены выражения для импульсной характеристики канала акустического трансформатора в случае прямого канала, выражение (2), и для случая учета многократных переотражений, выражение (5).

Проведенный анализ позволил установить следующие закономерности:

– ИХ прямого канала соответствуют модели идеальной линии задержки с затуханием. ИХ канала с переотражениями представляет собой затухающую последовательность дискретных лучей;
– полученные результаты времени задержки канала справедливы для бесконечного плоскопараллельного барьера. В случае не параллельности граней – задержка будет несколько выше;
– при малых значениях коэффициента отражения ($V < 0.3$) вклад переотражений становиться незначительным. В этом случае канал может быть рассмотрен как однолучевой.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты позволяют количественно оценить межсимвольную интерференцию, синтезировать оптимальный эквалайзер, выбрать параметры модуляции с учетом длительности эффективной ИХ канала.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: экспериментальная верификация предложенных моделей на стенде и ана-

лиз устойчивости различных видов модуляции к искажениям в акустическом канале.

Список используемых источников

1. Zhang J. et al. Wireless communication using ultrasound through metal barriers: Experiment and analysis //2015 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS). IEEE, 2015. С. 1-5.

2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Наука, 1973.

3. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1989. 416 с. ISBN 5-02-014155-0

4. Качнов А. В., Прасолов А. А., Туманова Е. И. Исследование характеристик канала акустического трансформатора с учетом многократных переотражений от границ барьера // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2025): Сборник научных статей XIV Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 2-х томах. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 128–133.

5. Иванов А. Н. Математическое моделирование процессов распространения акустических волн в структурно-неоднородных средах: дис. … канд.техн.наук: 01.04.06 / Иванов Андрей Николаевич. Владивосток, 2008, 141 с. EDN: NQFYUL

EVALUATION OF THE IMPULSE RESPONSE OF AN ACOUSTIC TRANSFORMER CHANNEL

Kachnov A. V., Perez-Calderon D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The aim of this work is deriving an analytical expression of a wireless acoustic channel in the ultrasound band and analyzing its impulse response. Based on the framework of linear systems and previously obtained frequency dependencies, rigorous expressions are derived for two use cases: the direct channel, with no reflections, and the complete channel, that incorporates the multiple reflections caused the barrier boundaries. It is shown that in the former case reflections lead to the formation of an impulse response in the form of a decaying sequence of discrete samples, which time delays and amplitudes are analytically related to the geometric and acoustic parameters of the barrier. The obtained results create a base for the synthesis of optimal equalizers and the selection of correction codes, enabling compensation of intersymbol interference and an increase in the throughput of the acoustic transformer communication channel.

Key words: impulse response, acoustic transformer, ultrasonic communication, multiple reflections, signal processing, structurally inhomogeneous channel

УДК 004.7
ГРНТИ 49.33.29

МИГРАЦИЯ СЕРВИСОВ В СЕТЯХ IOT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ EDGE- И FOG-ПОДХОДОВ

И. И. Комаров, А. И. Парамонов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается миграция сервисов в системах Интернета вещей с использованием многоуровневой вычислительной архитектуры, включающей edge- и fog-уровни. Анализируется роль fog-вычислений как промежуточного слоя между устройствами и облаком, обеспечивающего баланс между задержками, вычислительными ресурсами и сетевой нагрузкой. Рассматриваются сценарии переноса сервисов между уровнями архитектуры в зависимости от требований к производительности и надежности. Показано, что совместное использование edge- и fog-подходов повышает эффективность и гибкость IoT-платформ.

миграция сервисов, интернет вещей, fog computing, edge computing

Развитие концепции Интернет вещей (IoT) привело к быстрому росту числа подключенных устройств, создающих огромные объемы данных [1]. Датчики, мобильные устройства и промышленные контроллеры формируют распределенную инфраструктуру, требующую эффективной обработки информации в реальном времени. Традиционная облачная модель, основанная на централизованной обработке данных в удаленных дата-центрах, сталкивается с ограничениями, связанными с задержками передачи данных, пропускной способностью каналов связи и требованиями к надежности.

Для преодоления этих ограничений были предложены концепции Edge computing и Fog computing. Они предполагают перенос части вычислений ближе к источникам данных – на периферийные устройства и промежуточные узлы сети. В такой архитектуре возникает задача динамической миграции сервисов между уровнями системы с целью оптимизации производительности, устойчивости и энергопотребления.

Современные IoT-системы строятся по многоуровневому принципу, включающему:

1. Edge-уровень – устройства и контроллеры, расположенные непосредственно рядом с датчиками.

2. Fog-уровень – промежуточные вычислительные узлы (шлюзы, локальные серверы, маршрутизаторы с расширенной функциональностью).

3. Облачный уровень – централизованные дата-центры с высокой вычислительной мощностью и масштабируемостью.

Edge-вычисления ориентированы на минимизацию задержек и локальную обработку критически важных данных. Например, в промышленной автоматизации реакция на аварийную ситуацию должна происходить в миллисекундах. Fog-вычисления, в свою очередь, агрегируют данные от нескольких edge-узлов, обеспечивают предварительную аналитику, фильтрацию и маршрутизацию потоков данных в облако.

Такое распределение позволяет снизить нагрузку на магистральные каналы связи и обеспечить более гибкое управление сервисами.

Миграция сервисов – это процесс переноса вычислительного компонента (микросервиса) с одного узла инфраструктуры на другой без существенного прерывания его работы. В IoT-среде миграция может происходить:

– между edge-устройствами;
– с edge на fog;
– с fog в облако;
– обратно из облака на периферию.

Основные цели миграции:

– снижение задержек обработки;
– балансировка нагрузки; повышение отказоустойчивости;
– экономия сетевых и энергетических ресурсов;
– обеспечение мобильности пользователей или объектов.

В IoT-сценариях особенно актуальна динамическая миграция, инициируемая изменением условий среды: ростом нагрузки, ухудшением качества канала связи или перемещением устройства.

Edge-уровень обеспечивает выполнение задач с жесткими требованиями к задержкам [2]. Если сервис изначально размещен в облаке, но задержка становится критичной, его перенос на edge-узел позволяет значительно сократить время отклика. Однако edge-устройства обладают ограниченными ресурсами: процессорной мощностью, объемом памяти и энергопотреблением. Поэтому не все сервисы могут быть эффективно размещены на этом уровне.

Миграция на edge целесообразна для вычислительно умеренных, но чувствительных к задержке задач.

Fog-архитектура выступает связующим звеном между периферией и облаком [1, 3]. Fog-узлы обычно обладают большей вычислительной мощностью по сравнению с edge-устройствами, но расположены ближе к источникам данных, чем облачные серверы.

Основные функции fog-уровня:

– агрегация и фильтрация данных;
– локальная аналитика;
– координация группы edge-устройств;
– временное хранение данных;
– обеспечение отказоустойчивости.

Миграция сервисов на fog-уровень позволяет достичь компромисса между производительностью и масштабируемостью. Например, задачи машинного обучения могут выполняться на fog-узлах для предварительной обработки, тогда как обучение моделей осуществляется в облаке.

Таким образом, fog-уровень играет ключевую роль в балансировке нагрузки и снижении сетевого трафика.

Сценарии миграции сервисов:

1. Сценарий снижения задержек. При обнаружении увеличения времени отклика система управления может инициировать перенос сервиса ближе к источнику данных – с облака на fog или edge. Это особенно актуально для мобильных пользователей и транспортных систем.

2. Сценарий балансировки нагрузки. Если edge-устройство перегружено, часть сервисов может быть перемещена на fog-узел. Аналогично, при перегрузке fog-узла вычисления могут быть частично переданы в облако.

3. Сценарий обеспечения надежности. В случае отказа узла сервис автоматически переносится на резервный fog- или облачный сервер. Такая стратегия повышает устойчивость системы к сбоям.

4. Сценарий энергосбережения. Для устройств с ограниченным энергопитанием выгодно переносить ресурсоемкие вычисления на fog-уровень. Это продлевает срок автономной работы IoT-устройств.

Для реализации миграции используются технологии виртуализации и контейнеризации. Контейнерные платформы позволяют быстро переносить сервисы между узлами с минимальными накладными расходами.

Важную роль играют:

– механизмы оркестрации;
– системы мониторинга состояния сети и ресурсов;
– протоколы передачи данных с поддержкой QoS;

– алгоритмы принятия решений на основе анализа нагрузки.

Интеграция двух подходов обеспечивает:

1. Гибкость архитектуры – возможность адаптации к различным сценариям использования.

2. Снижение задержек – обработка данных ближе к источнику.

3. Сокращение сетевого трафика – передача в облако только обработанных данных.

4. Повышение отказоустойчивости – распределение сервисов по нескольким уровням.

5. Оптимизацию затрат – рациональное использование вычислительных ресурсов.

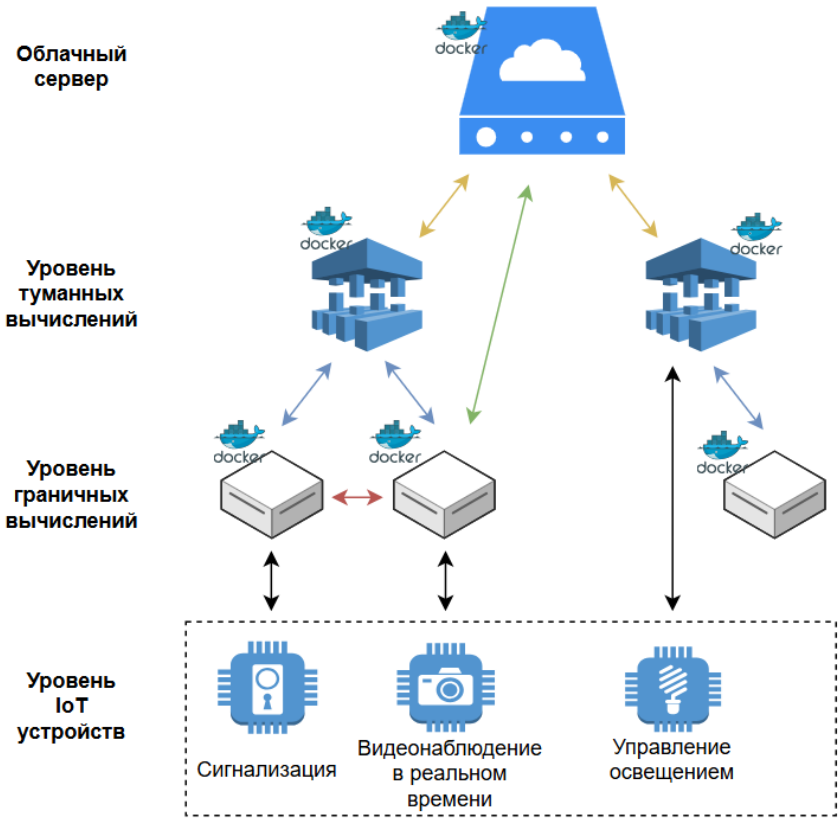


Рис. 1. Топология сети с использованием Edge- и Fog-подходов

На изображении цветами указаны направления миграции (рис. 1).

Комплексное применение edge- и fog-подходов формирует распределенную интеллектуальную среду, способную динамически адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации.

Миграция сервисов в сетях Интернета вещей является важным механизмом обеспечения эффективности и устойчивости распределенных систем.

Использование многоуровневой архитектуры, включающей edge- и fog-уровни, позволяет гибко перераспределять вычислительные ресурсы в зависимости от требований к задержкам, надежности и энергопотреблению.

Fog-уровень играет роль стратегического посредника между периферией и облаком, обеспечивая баланс между производительностью и масштабируемостью. Совместное применение edge- и fog-подходов способствует созданию адаптивных IoT-платформ нового поколения, способных эффективно функционировать в условиях высокой динамики и больших объемов данных.

Список используемых источников

1. Рубашенков А. М. Интернет вещей / А. М. Рубашенков, А. В. Бобров // Достижения науки и образования, 2018. С. 1-3

2. Mamadaliev N. Edge computing: transforming data processing at the edge // Universum: технические науки: электрон. научн. журн., 2023. С. 51-52. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16337 (дата обращения: 14.02.2026)

3. Кирсанова А. А. Обзор технологий организации туманных вычислений / А. А. Кирсанова, Г. И. Радченко, А. Н. Черных // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2020. С. 40-43

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры ССиПД СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом А. И. Парамоновым.

MIGRATION OF SERVICES IN IOT NETWORKS USING EDGE AND FOG APPROACHES

Komarov I., Paramonov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers the migration of services in Internet of Things systems using a multi-level computing architecture, including edge and fog layers. The role of fog computing as an intermediate layer between devices and the cloud, providing a balance between latency, computing resources and network load, is analyzed. Scenarios for transferring services between architecture levels are considered, depending on performance and reliability requirements. It is shown that the combined use of edge and fog approaches increases the efficiency and flexibility of IoT platforms.

Key words: service migration, internet of things, edge computing, fog computing

УДК 681.5
ГРНТИ 71.01.85

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОКОЛА ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ СБОЕВ МЕЖДУ ДВУМЯ МАРШРУТИЗАТОРАМИ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Д. А. Корнюшкин, А. А. Крылов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуется проблема обеспечения бесперебойной связи в многоуровневой системе контроля, где устойчивость каналов передачи данных между маршрутизаторами является критически важным фактором. В качестве основного механизма мониторинга рассматривается протокол обнаружения сбоев Bidirectional Forwarding Detection, обеспечивающий минимальное время обнаружения обрывов каналов связи. Однако классическая его реализация обладает реактивной природой и ограниченными возможностями адаптации к различным сетевым состояниям. Целью работы является разработка архитектуры интеллектуального управления, которая интегрирует протокол BFD с подсистемой на основе искусственного интеллекта для перехода от реактивного обнаружения отказов к их предиктивному обнаружению и устранению.

протокол BFD, обнаружение сбоев, предиктивная аналитика, искусственный интеллект, нейронные сети, многоуровневые системы контроля

Использование протокола обнаружения сбоев между двумя маршрутизаторами в многоуровневую систему контроля с нейросетевым регулятором на типовом спортивном объекте представляет собой техническое решение, направленное на оперативное выявление деградации и потери связности в сегментах сетевой инфраструктуры с жесткими требованиями к времени отклика и отказоустойчивости. Протокол обнаружения сбоев между двумя маршрутизаторами был интегрирован в архитектуру сетевой подсистемы стадиона как механизм оперативного обнаружения двусторонних сбоев на канальном и сетевом уровне, а нейросетевой регулятор обеспечил предопределенное и контекстно-зависимое управление его параметрами и поведением [1]. Из рис. 1 следует, что сетевая инфраструктура хоккейного стадиона имеет многоуровневую и мультисегментную структуру, включающую узлы доступа, ядра и подсистему управления, обслуживающую как производственные, так и критически важные сервисы, такие как системы видеонаблюдения, телеметрии, управления доступом, трансляционного оборудования и инженерного кон-

троля. Учитывая высокий уровень нагрузки в периоды проведения массовых мероприятий, необходимо было гарантировать минимальное время обнаружения и локализации сбоев и быстрое переключение на резервные маршруты связи [2]. На основе анализа требований к высокой доступности было принято решение о внедрении протокола обнаружения сбоев между двумя маршрутизаторами, который позволяет проверять доступность сетевых каналов со временем реакции, не превышающим 50–300 мс, что на порядок быстрее традиционных протоколов маршрутизации и контроля канального уровня. Протокол обнаружения сбоев между двумя маршрутизаторами был инициирован в асинхронном режиме на критических линках между уровнями агрегации и ядра и на соединениях маршрутизаторов с системами обеспечения безопасности и видеонаблюдения [3]. Протокол обеспечил двустороннюю проверку доступности между парой элементов, независимо от верхнего уровня логики маршрутизации, и, в случае обнаружения обрыва, немедленно инициирует обновление таблиц маршрутизации или включение механизма переключения резервного канала [4].

Основным определяющим технологическим решением стало внедрение нейросетевого регулятора, который был обучен на реальных и синтетических данных телеметрии сети, включая логи BFD, состояния интерфейсов и данные о задержках, колебаниях RTT и частоте срабатывания аварийных условий [5]. На основе этих данных нейросетевой регулятор классифицировал типы соединений по устойчивости, выявлял аномалии в поведении каналов, прогнозировал потенциальные сбои и управлял функциональностью в динамическом режиме. В стандартной реализации параметры BFD такие как, интервалы повторов, таймауты, чувствительность к обрывам заранее задаются администратором и остаются статичными независимо от текущей нагрузки или поведения узлов. Однако, в разработанной системе, нейросетевой регулятор адаптировал параметры BFD в зависимости от контекста: времени суток, характера мероприятия, уровня трафика, стабильности предыдущих периодов, вероятности сбоя, предсказанной на основе работы рекуррентной нейронной сети с памятью LSTM. В качестве примера рассмотрим следующий сценарий. При приближении времени начала спортивного мероприятия, и росте трафика видеонаблюдения, регулятор снижает интервал отправки контрольных сообщений BFD ускоряет реакцию на сбои в сети [6]. Напротив, в периоды низкой активности параметры BFD автоматически снижает нагрузку на процессорные ресурсы оборудования. Дополнительно, в архитектуру регулятора была внедрена графовая нейросетевая модель, обученная на абстрактной модели сетевой структуры стадиона, что позволило проводить анализ взаимосвязей между сетевыми узлами и пред-

сказывать потенциальные каскадные отказы. GNN-модель позволяла оценивать риски не только локальных сбоев, но и их влияния на смежные сегменты сети. На основе таких прогнозов нейросетевой регулятор динамически перестраивает маршруты и, в случае высокой вероятности сбоя, инициирует превентивные переключения путей, используя информацию от протокола как триггер [7].



Рис. 1. Основные задачи использования искусственного интеллекта для оптимизации сети

Новизна интегрированного решения на типовом спортивном объекте, заключается в объединении механизма быстрого обнаружения отказов канального уровня с когнитивной системой управления, обладающей обучаемой и предиктивной архитектурой. В отличие от традиционного подхода, при котором BFD выступает изолированной технологией мониторинга, в данной системе он стал частью интеллектуальной самонастраивающейся системы, подчиненной целям обеспечения отказоустойчивой, гибкой и адаптивной сетевой инфраструктуры [8].

Результаты внедрения подтверждают эффективность нового алгоритма, среднее время реагирования системы на сбой, от момента возникновения до активации альтернативного пути, сократилось до 75 мс, количество ложных срабатываний протокола снизилось на 42 % по сравнению с ранее применявшимися статическими параметрами, а в пиковые периоды нагрузок система сохраняла высокий уровень доступности свыше 85 %. Автоматические корректировки, произведенные нейросетевым регулятором в BFD-настройках в зависимости от времени и контекста событий, доказали свою устойчивость и способность увеличивать производительность без потери достоверности обнаружения. Таким образом, внедрение BFD в совокупности с нейросетевым регулятором дало возможность превратить систему сетевого контроля хоккейного стадиона в предиктивно-реактивную многослойную архитектуру, в которой отказоустойчивость более не зависит исключительно от скорости графов маршрутизации или ручной настройки, а формируется как результат интеллектуального анализа, непрерывной адаптации и обучаемого контроля поведения сети.

Список используемых источников

1. Лазарева Н. Б., Горбачев К. А. Системы мониторинга оборудования // E-Scio. 2020. № 2.

2. Тимочкина Т. В. Применение нейронных сетей для обнаружения сетевых атак / Т. В. Тимочкина, Т. М. Татарникова, Е. Д. Пойманова // Изв. вузов. Прибостроение. 2021. 64(5). С. 357-363.

3. Симаворян С. Ж. Общая концепция выявления вторжений неизвестного типа на основе нейронных сетей / Симаворян С. Ж., Симонян А. Р., Попов Г. А., Улитина Е. И. // Программные системы и вычислительные методы. № 4. 2021.С. 23 45. DOI: 10.7256/2454–0714.2021.4.37072. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=37072 (дата обращения: 19.01.2024).

4. Арзамасцев Н. А. Особенности использования искусственных нейронных сетей в сфере информационной безопасности / Арзамасцев Н. А. // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» № 5. 2022. С. 3936 3945. URL: https://ru/article/n/osobennosti-ispolzovaniya-iskusstvennyh-neyronnyh-setey-v-sfere-informatsionnoy-bezopasnosti/viewer. (дата обращения: 19.01.2024).

5. Попов Д. И. Подход к разработке базы правил для экспертной системы выбора адаптивной стратегии обучения / Попов Д. И., Демидов Д. Г. // Автоматизация и управление в технических системах. № 1-2 (9). С. 93-102. URL: http://journals.org/index.php/auts/issue/archive (дата обращения: 20.01.2024).

6. Симаворян С. Ж. Процедура выявления вторжений в системах информационной безопасности на основе использования нейронных сетей. / Симаворян С. Ж., Симонян А. Р., Попов Г. А., Улитина Е. И. // Программные системы и вычислительные методы. № 3. 2020. DOI: 10.7256/2454-0714.2020.3.33734. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=33734. (дата обращения: 19.01.2024).

7. Коцарева И. С. Основные этапы мониторинга по поиску и обнаружению скрытых атак в информационных системах / Коцарева И. С., Рябова Е. В., Симонян А. Р., Симаворян С. Ж. // Международный форум молодых исследователей. С. 222-230. URL: https://sciencen.org/assets/DOI/KOF-413-Kocareva-Ryabova-Simonyan-222-230.pdf. (дата обращения: 19.01.2024).

KORNYUSHKIN D., KRYLOV A. USING A FAULT DETECTION PROTOCOL BETWEEN TWO ROUTERS IN A MULTI-LEVEL CONTROL SYSTEM USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Kornyushkin D., Krylov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines the problem of ensuring uninterrupted communication in a multi-level control system, where the stability of data transmission channels between routers is a key factor. The Bidirectional Forwarding Detection protocol is considered as the main monitoring mechanism, which provides the minimum detection time for communication channel interruptions. However, its classical implementation has a reactive nature and limited adaptability to various network conditions. The aim of the work is to develop an intelligent control architecture that integrates the BFD protocol with an artificial intelligence-based subsystem to move from passive fault detection to predictive fault detection and elimination.

Key words: BFD protocol, fault detection, predictive analytics, artificial intelligence, neural networks, multi-level control systems

УДК 681.5
ГРНТИ 71.01.85

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОКОЛА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СВЯЗИ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Д. А. Корнюшкин, А. А. Крылов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена проблеме повышения надежности и адаптивности управления распределенной сетевой инфраструктурой критически важных объектов в условиях динамичных и интенсивных информационных потоков. В качестве объекта исследования рассматривается многоуровневая система контроля с применением искусственного интеллекта современного спортивного стадиона, объединяющая множество технологических подсистем, таких как, видеонаблюдение, телетрансляция, система контроля и управления доступом, системы жизнеобеспечения. Целью работы является разработка и апробация интегрированного подхода, сочетающего протокол резервирования каналов связи Rapid Spanning Tree Protocol с нейросетевым регулятором на основе рекуррентной сети с LSTM-элементами. Данный подход обеспечивает переход от реактивного к проактивному управлению топологией сети.

сетевая устойчивость, протокол резервирования RSTP, нейросетевой регулятор, предиктивное управление, многоуровневые системы контроля

Использование протокола резервирование связи в многоуровневую систему контроля с нейросетевым регулятором на типовом спортивном объекте является шагом в направлении повышения надежности и адаптивности управления распределенной сетевой инфраструктурой в условиях высокой динамики информационных потоков и критически важной операторской нагрузки. Главной целью использования протокола резервирования связи стало обеспечение максимально быстрого восстановления сети после возникновения аварийной ситуации, поддержание непрерывности функционирования технологических процессов и реализация интеллектуального, самонастраивающегося механизма управления сетевой топологией на основе анализа текущего и прогнозируемого состояния [1]. Объектом внедрения послужил современный хоккейный стадион с распределенной инженерно-технической средой и множеством электронных подсистем, таких как видеонаблюдение, видео-трансляционное оборудование, билетные сервисы,

системы СКУД, пожарная сигнализация, IP-телефония, и системы жизнеобеспечения [2]. Данные системы функционируют в рамках компьютерной сети с многоуровневой архитектурой, которую необходимо поддерживать в состоянии высокой готовности, с минимально возможным временем отклика и переключения между маршрутами [3]. На первом этапе проведения работ была модернизирована существующая сетевая инфраструктура путем перехода от классического Spanning Tree Protocol к протоколу Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP, IEEE 802.1w). Основным преимуществом RSTP стала его способность обеспечивать быстрое восстановление работоспособности сети в пределах 1-5 секунд, при переключении между активными и резервными путями передачи данных без необходимости длительной переработки топологии. Все активные коммутаторы, участвующие в уровне агрегации и ядра сети, были переведены в режим поддержки резервирования связи, с заданием приоритетов и ролей сетевым узлам в соответствие с проектной топологией [4]. Ключевым элементом инновационного подхода стало внедрение нейросетевого регулятора, функционирующего как интеллектуальный управляющий модуль, способный в реальном времени анализировать параметры функционирования сети и адаптировать конфигурации сетевых устройств на основе алгоритмов глубокого обучения. Нейросетевой регулятор был построен на основе многослойной рекуррентной нейронной сети с элементами LSTM-моделирования, что обеспечило возможность не только учитывать текущее состояние сети, но и прогнозировать ее поведение по временным рядам трафиковых метрических данных [5]. Обработка поступающих телеметрических данных осуществлялась с помощью специализированных программных агентов, собирающих информацию о задержках, нагрузке на порты, статусах соединений, количестве ошибок каналов, частоте BPDU-пакетов и нестабильных портах. На основе этих данных нейросетевой регулятор формирует оценку ожидаемой устойчивости сетевых связей, степень вероятности сбоев и предлагает оптимальные пути перенастройки ролей в рамках протокола RSTP [6]. Из рис. 1 видно, что в ряде критических сценариев, например, перед началом спортивного мероприятия или в моменты перегрузки видеопотоков нейросетевой модуль автономно перераспределял нагрузку, изменяя приоритеты мостов и отключая логически неустойчивые связи еще до наступления фактических отказов.

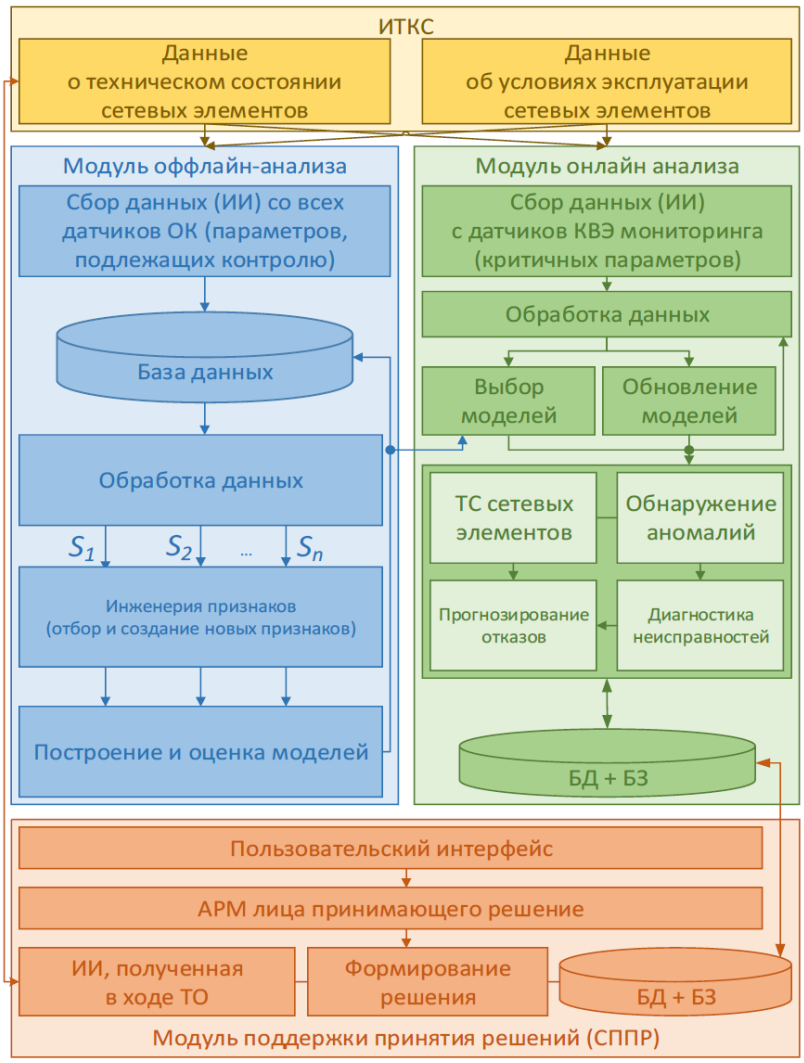


Рис. 1. Структура процесса сетевого мониторинга в случае возникновения сетевой неисправности

Инновационность предложенного решения заключается в способности нейросетевого регулятора предиктивно адаптировать параметры RSTP с учетом не статической конфигурации, а прогнозной модели поведения сети. Такой подход позволил перейти от реактивного к проактивному управлению сетевой топологией. Функционируя в тандеме с RSTP, нейросетевой регулятор стал надстройкой, предоставляющей механизм когнитивного принятия решений. Его способность к обучаемости позволила усовершенствовать алгоритмы действий по мере накопления статистики работы сети на стадионе, особенно в условиях вариативной загруженности в разные временные периоды суток, различия по типам мероприятий: «матч», «тренировка», «концерт» и специфике пользовательских сценариев [7]. Дополнительно было реализовано визуализированное ядро мониторинга на основе когнитивной графовой модели, где каждый сетевой порт

и узел представляется в виде вершины с весовыми коэффициентами, вычисляемыми нейросетью. С учетом изложенного стоит отметить, что данный подход позволил достигнуть контекстно-зависимой реакции на события, допустим, переключение приоритетов RSTP не только при аппаратном отказе, но и при «логическом перегреве» части сети, например, снижении характеристик канала при допустимых физических параметрах [8].

Результаты внедрения подтвердили эффективность предложенного подхода, было зафиксировано сокращение количества внештатных ситуаций, вызванных переключением топологии, снижение времени восстановления работоспособности сети до 0,9 секунд в типовых сценариях переключения, и полное отсутствие потерь видеопотока при автоматическом перераспределении маршрутизации. Кроме того, нейросетевой регулятор продемонстрировал способность обнаруживать деградацию сетевых участков за 5 минут до их отказа и формировать команды перемаршрутизации без вмешательства администратора. Итак, внедрение RSTP в сочетании с нейросетевым регулятором позволило трансформировать управление многоуровневой сетью хоккейного стадиона из статической модели в интеллектуально-динамическую среду с элементами самообучающейся адаптации, обеспечивающую высокий уровень устойчивости, гибкости и предсказуемости поведения сетевой инфраструктуры в условиях реального времени.

Список используемых источников

1. Аллакин В. В., Будко Н. П., Васильев Н. В. Общий подход к построению перспективных систем мониторинга распределенных информационно-телекоммуникационных сетей // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 125-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-125-227.

2. Кутузов Д. В., Осовский А. В., Старов Д. А., Перова К. В., Мальцева Н. С. анализ и прогнозирование трафика современных телекоммуникационных систем на основе методов искусственного интеллекта // вестник астраханского государственного технического университета. серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 1.

3. Будко Н. П. Сокращение объема измерительной информации на основе интеллектуального подхода к построению системы мониторинга информационно-телекоммуникационной системы // Техника средств связи. 2021. № 1 (153). С. 86-97.

4. Будко Н. П. Общие принципы функционирования и требования к построению структур перспективных систем мониторинга распределенных информационно-телекоммуникационных сетей // Техника средств связи. 2021. № 2 (154). С. 38-60.

5. Аллакин В. В., Будко Н. П. Идентификация состояния узлов информационно-телекоммуникационных сетей общего пользования подсистемой мониторинга информационной безопасности // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 58-64.

6. Бородин А. С. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений / А. С. Бородин, А. Н. Волковым, А. С. Мутханной, А. Е. Кучерявым «Электросвязь», № 1, 2021, С. 17-22.

7. Волков А. Н. Идентификация трафика сервисов в сетях связи IMT-2020 и последующего поколения на основе метаданных потоков и алгоритмов машинного обучения / А. Н. Волков, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. 2020. № 11. С. 21-28.

8. Кучерявый А. Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44-46.

USING THE COMMUNICATION REDUNDANCY PROTOCOL IN A MULTI-LEVEL CONTROL SYSTEM USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Krylov A., Kornyushkin D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the problem of increasing the reliability and adaptability of managing a distributed network infrastructure of critical facilities in conditions of dynamic and intensive information flows. A multilevel computer network of a modern sports stadium is considered as an object of research, combining many technological subsystems such as video surveillance, television broadcasting, access control and management system, life support systems. The aim of the work is to develop and test an integrated approach combining the Rapid Spanning Tree Protocol communication channel redundancy protocol with a neural network regulator based on a recurrent network with LSTM elements. This approach provides a transition from reactive to proactive network topology management.

Key words: network stability, RSTP redundancy protocol, neural network regulator, predictive control, multi-level control systems

УДК 621.396.99
ГРНТИ 49.33.29

ДИДАКТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ V2X

В. Е. Коротин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Обоснована необходимость и рассмотрена дидактическая модель внедрения в учебный процесс изучения систем V2X, потенциал технологий которых в наибольшей мере отвечает на сегодняшний день задачам разработки радиодоступа кибер-физических систем по их основным целевым показателям – высокой надежности и сверх малой задержке в условиях высокой плотности и мобильности пользовательских устройств.

радиодоступ, кибер-физические системы, ITS, DSRC, VANET, C-V2X.

Современные тенденции развития систем радиодоступа определяются общественной потребностью в обеспечении связанности кибер-физических систем, действующих в рамках концепции Industry 4.0, приложений телемедицины, беспилотного транспорта и других, только прогнозируемых или разрабатываемых сегодня. Важным аспектом успешной реализации этих задач является подготовка специалистов, обладающих достаточным уровнем компетентности для разработки соответствующих технологий радиодоступа. В этой связи было бы целесообразно дополнить учебные дисциплины кафедры БТС, формирующие компетенции в сфере систем радиосвязи радиодоступа, локальных беспроводных сетей, дидактическими блоками по изучению современной теории и практики существующих на сегодняшний день систем, потенциально обладающих требуемыми характеристиками высокой надежности, низкой задержки и масштабируемой мобильности и плотности устройств. Предпочтительными для этой цели могут стать технологии, нашедшие широкое распространение в международной практике и имеющие стандартизированные решения, а также гармонизированные с точки зрения использования радиочастотного спектра.

Адекватным решением поставленной задачи представляется получившая в последнее время широкое распространение теория и практика интеллектуальных транспортных систем, особенно в части формирования и ши-

рокого признания на основе соответствующей международной стандартизации и радиочастотной регламентации соответствующего ей радиодоступа, реализуемого в V2X (Vehicle-to-Everything) коммуникациях. По данным аналитического исследования SBS Consulting, к 2030 году объем рынка беспилотного и автономного транспорта вырастет в 2–4 раза [1], причем лидирующие темпы роста отмечены в сегменте беспилотного автотранспорта.

Кафедра БТС преподает ряд дисциплин, в рамках которых было бы целесообразно рассмотреть соответствующие аспекты V2X: характеристики, архитектура и состав, достоинства и требующие решения вопросы, практику внедрения и решения по гармонизации используемого спектра; стандартизацию и сегментацию по гетерогенным технологиям радиодоступа с указанием на технологические возможности их конвергенции. При этом важно дидактически обосновано распределить необходимый для этого учебный материал между отдельными дисциплинами в определенной последовательности, представляющей указанные выше вопросы. В привязке к учебному графику освоения различных по уровню программ подготовки это можно было бы сделать следующим образом.

На начальном этапе – в рамках дисциплин, вводящих студентов в профессиональную сферу выбранной специальности/направления – следует изложить материалы, указывающие на социально-экономическую и экологическую значимость и перспективы развития технологий V2X для удовлетворения насущных и формирующихся потребностей информационного общества. Здесь описывается архитектура систем, сферы применения и взаимосвязь с другими технологиями и системами, излагается статистика, приводится перечень международных программ развития и регламентаций, указываются проблематика и тенденции развития. Главная цель этого – зародить профессиональный интерес к данным технологиям. Наиболее уместным видится реализация в таких дисциплинах, как Введение в специальность, Перспективы развития отрасли ИКТ и аналогичных по месту в образовательной программе. Базовые сведения, которые должен усвоить обучающийся.

1. Технологии V2X разрабатываются для Кооперативных интеллектуальных транспортных систем (C-ITS), но могут с успехом применяться в сценариях, требующих обеспечения малой задержки, высокой плотности устройств, перемещающихся с большими скоростями, высокой информационной безопасности [2]. Системы V2X призваны обеспечить в сфере дорожного движения решение трех задач:

а) повышение безопасности и управляемости наземного транспорта,

б) улучшение экологичности и экономичности автотранспорта,

в) создание удобства пользователям транспорта в получении информационных услуг.

2. Архитектура (рис. 1) включает [3] взаимодействие транспортного средства с транспортным средством (V2V), транспортного средства с дорожной инфраструктурой (V2I), транспортного средства с пешеходами (V2P и VRU – другими участниками дорожного движения подвергающимся опасности), транспортного средства с информационными сетями (V2N).



Рис. 1. Архитектура, функционал и проекция C-ITS на сценарии IMT-2020

Эти каналы прямой связи (D2D) позволяют реализовать ряд систем активной безопасности, таких как: предупреждение о слепой зоне, помощь в перестроении (смены полосы движения), запрет обгона, оповещение о пешеходах, предупреждение о дорожных работах и система экстренного торможения.

3. Международные программы:

DIRAC – aDaptive spatIal Reuse of rAdio resourCes),

SECUR – Safety Enhancements through Connected Users on the Road,

WAVE – Wireless Access in Vehicular Environments (программа, воплощенная в стандарт IEEE 802.11p на основе ISO проекта CALM – Communications Access for Land Mobiles).

Следующий этап приобретения компетенций V2X можно определить как «все познается в сравнении». Для этого соответствующие материалы следует включить в программы дисциплин, преподающих принципы построения и основные характеристики систем связи: для бакалавриата/спе-

циалитета – такие как системы радиосвязи, системы мобильной связи и аналогичные. Важно отразить в этих разделах программы дисциплины место и роль V2X среди других телекоммуникационных систем и сетей, особо подчеркнув проекцию потребительских свойств на такие сценарии IMT-2020/2030 как eMBB, mMTC, uRLLC. Кроме того, важно указать на взаимосвязь с другими беспроводными сетями, обеспечивающими связность на основе Ad-hoc соединений (Рисунок 2) [4].

Технологический этап освоения V2X предназначен для изучения двух преимущественно применяемых технологий: DSRC (Dedicated Short-Range Communications) и C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything). В таблице 1 приведены технические характеристики этих двух технологий.[5]

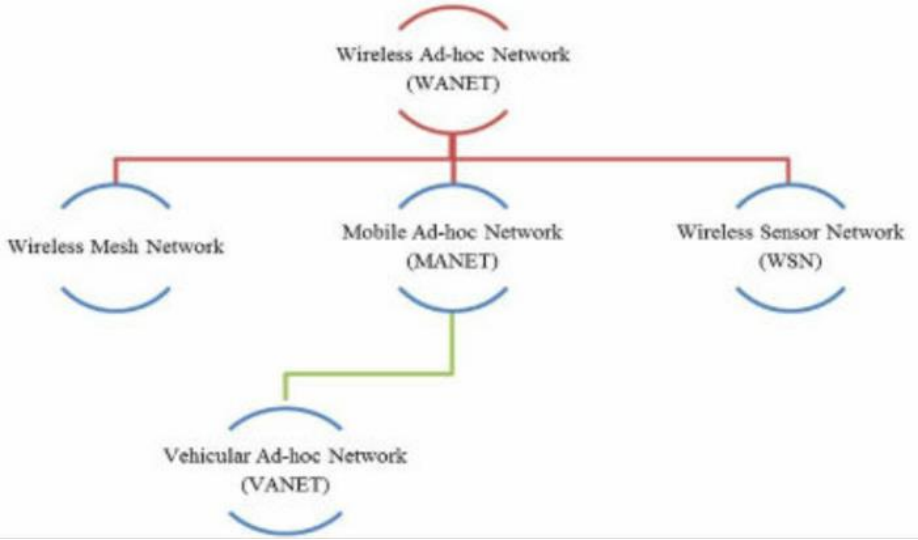


Рис. 2. Иерархия Ad-hoc сетей

Следует определить вклад в формирование характеристик как технологий физического слоя (в первую очередь, благодаря вариативности нумерологии), так и протоколов канального и сетевого слоев.

Технологии как C-V2X, так и DSRC имеют существенную вариацию характеристик по поколениям стандартов, что наглядно представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение параметров технологий DSRC и C-V2X

Параметр	DSRC		C-V2X	
	IEEE 802.11p	IEEE 802.11bd	LTE	5G NR
Частотный диапазон	5.9 ГГц	5.9 ГГц и 60 ГГц	30 ГГц-300ГГц	5.9 ГГц и 60 ГГц

Параметр	DSRC		C-V2X	
	IEEE 802.11p	IEEE 802.11bd	LTE	5G NR
Полоса канала	10 МГц	10 МГц и 20 МГц	10 МГц и 20 МГц	До 100 МГц
PHY	OFDM	OFDM	SC-FDM	OFDM
Модуляция	BPSK, QPSK, 16- QAM, 64-QAM	BPSK-DCM, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM & 256-QAM	Rel.14: QPSK, 16-QAM Rel.15:64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Канальное кодирование	BCC	LDPC	Турбо-код	LDPC
Поднесущих на ресурсный блок	Нет	Нет	12	12
Символов на ресурсный блок	Нет	Нет	14	14
Разнос поднесущих	156,25 кГц	312.5 кГц, 156.25 кГц, 78.125 кГц	15 кГц	sub-6 ГГц: 15, 30, 60 кГц; mmWave: 60, 120 кГц
Длительность символа	8 мкс	8 мкс	71 мкс	71 мкс
Задержка	~0,4 мс	~0,4 мс	~1 мс	~1 мс

В этом же сегменте освоения программы необходимо указать на значительное место протоколов маршрутизации и привести их классификацию. Применительно к DSRC в части обеспечения функционала VANET маршрутизация остается наиболее важным аспектом формирования требуемых характеристик задержки. Предполагаемые дисциплины: Технологии беспроводного доступа, Технологии систем радиодоступа и аналогичные.

Этап моделирования и разработки следует отнести к периоду магистерской подготовки и выполнению выпускной квалификационной работы специалитета/бакалавриата. На этом этапе формируются навыки исследовательской работы магистрантов (по усовершенствованию, например, протоколов доступа к среде и/или маршрутизации, оптимизации параметров радио интерфейса), математического и/или имитационного моделирования и проектной деятельности выпускников по программам подготовки бакалавров и инженеров.

Список используемых источников

1. ALTUNTAŞ S., Aba S. Technology forecasting of unmanned aerial vehicle technologies through hierarchical S-curves // Defence Science Journal. 2022. Т. 72. № 1.
2. Ansari K. Joint use of DSRC and C-V2X for V2X communications in the 5.9 GHz ITS band //IET Intelligent Transport Systems. 2021. Т. 15. № 2. С. 213-224.
3. Ghafoor K. Z. et al. Enabling efficient coexistence of DSRC and C-V2X in vehicular networks //IEEE Wireless Communications. 2019. Т. 27. № 2. С. 134-140.
4. Hoa La V. and Cavalli A., “Security Attacks and Solutions in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey,” Int. J. AdHoc Netw. Syst., vol. 4, no. 2, pp. 1–20, 2014.
5. Jin Y., Liu X., Zhu Q. DSRC & C-V2X comparison for connected and automated vehicles in different traffic scenarios //arXiv preprint arXiv:2203.12553. 2022.

DIDACTIC CONDITIONS FOR V2X TECHNOLOGIES TEACHING

Korotin V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Necessity is validated and possible didactic model is proposed for implementation of V2X systems teaching within the scope of current curricula due to their technological potential mostly satisfying at the present time the basic objective requirements to radio access in cyber-physical systems: high reliability and ultra-low latency along with the user devices mobility and scalable density.

Key words: cyber-physical systems, ITS, radio access, DSRC, VANET, C-V2X

УДК 654.164
ГРНТИ 49.33.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НИЗКОЙ ЗАДЕРЖКИ В ПРИЛОЖЕНИЯХ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

В. Е. Коротин, В. Б. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Наряду со стремительным развитием современных технологий, беспилотные транспортные станут неизбежной тенденцией будущего благодаря тем практическим преимуществам, которые они приносят. Более 90 % дорожно-транспортных происшествий происходят из-за человеческого фактора. Беспилотные автомобили обладают «обзором» на 360 градусов, реагируют быстрее и точнее, способны более эффективно предотвращать столкновения и минимизировать человеческие жертвы. Данная технология позволяет оптимизировать скорость и дистанцию между транспортными средствами, координировать интеллектуальные транспортные потоки, обеспечивая беспрепятственное движение. Пассажиры могут работать, отдыхать или развлекаться вместо того, чтобы сосредотачиваться на вождении, что особенно полезно в условиях интенсивного городского движения или на длинных автомагистралях. Это открывает возможности для независимого передвижения пожилых людей и людей с ограниченными возможностями. Поэтому важное значение имеет исследование технологий V2X (Vehicle-to-Everything) информационных транспортных систем. Одной из задач такого исследования – сравнительному анализу возможных технологий радиодоступа указанных систем – посвящена данная работа.

ITS, 5G-NR, V2X, C-V2X, DSRC

Функционал V2X как средство обеспечения малой задержки

Рассматривая технологические возможности обеспечения малой (не более 10 мсек) и сверхмалой (не более 1 мсек) задержки современных систем подвижной связи следует обратиться в первую очередь к системам интеллектуальных транспортных коммуникаций (ITS). Эти системы реализуют функциональность V2X – коммуникационной системы для передачи информации между автомобилями и всеми объектами транспортной инфраструктуры. Связь V2X помогает объединить транспортные средства в единую сеть, передавая критически важные данные для обеспечения транспортной безопасности и иную информацию, поддерживающую экономическую (ресурсно-топливную) эффективность и экологическую безопасность

наземного транспорта, а также позволяющую обеспечить использование информационных ресурсов на борту движущегося автомобиля.

В настоящее время выделяют четыре основных режима работы, реализованных в технологии V2X. К ним относятся: V2V (Vehicle-to-Vehicle), V2I (Vehicle-to-Infrastructure), V2P (Vehicle-to-Pedestrian), V2N (Vehicle-to-Network). Данные режимы работы проиллюстрированы на рисунке 1. Эти четыре режима могут использоваться одновременно для обеспечения максимальной безопасности и расширения возможностей управления автономными транспортными средствами. Благодаря обмену данными с окружающими объектами и датчиками, система позволяет эффективно предотвращать аварии.



Рис. 1. Проекция интерфейсов V2X на сценарии IMT20202

Таким образом, при анализе перспектив использования той или иной технологии для обеспечения низкой задержки следует ориентироваться на все указанные выше задачи поддержки связанности. Указанные задачи должны быть реализованы в совокупности, что указывает на совпадение их с основными сценариями пользовательского доступа, поддерживаемыми технологией физического слоя 5G-NR. Сценарий mMTC обеспечивает функциональность связи датчиков и исполнительных устройств систем автомобиля с серверами управления экологическими показателями и эффективности использования ресурсов. Сценарий URLLC непосредственно связан с обеспечением безопасности дорожного движения, Сценарий eMBB служит обеспечению комфорта пассажиров в обмене мультимедийным контентом и получении информационных услуг.

Анализ перспективных технологий для обеспечения низкой задержки

На сегодняшний день варианты ограничиваются двумя возможностями: использованием технологий систем сотовой связи (5G и выше – в недалеком будущем) и беспроводных локальных сетей линейки стандартов IEEE 802.11. Оба указанных выше варианта – как Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X), являющийся продуктом 3GPP, так и Dedicated Short-Range Communication (DSRC), основанный на стандартах IEEE – предусматривают работу в одном и том же нелицензируемом участке спектра 5,9 ГГц, выделенном для интеллектуальных транспортных систем. Это определяет справедливый подход для сравнительного анализа возможности реализации низкой задержки этими технологиями на физическом уровне.

Начиная с LTE Release 14 в рамках разработок 3GPP для реализации C-V2X используется D2D (device-to-device) интерфейс, известный как PC5, предусматривающий поддержку VANET в двух режимах: Mode 3 и Mode 4 [1], что обеспечивает сквозную задержку (end-to-end) менее 10 мс и задержку установления соединения в 1 мс. Mode 3 – это централизованный режим, когда управление радио ресурсами V2V осуществляется сотовой сетью (но без использования интерфейс Uu). Mode 4 предусматривает автономный выбор радио ресурсов автомобилем на основе Semi-Persistent Scheduling (SPS) протокола. Оба варианта обеспечивают дальность связи более 450 метров в режиме прямой связи и охватывают более обширные территории при использовании инфраструктуры сотовой сети [2]. Однако отсутствие возможности управления задержкой на физическом уровне за счет вариации нумерологии в технологии радиодоступа LTE ставит ее в невыгодное положение по сравнению с возможностями NR-V2X (основанными на характеристиках радиодоступа 5G-NR). Основное преимущество 5G-NR иллюстрирует рисунок 2, отражающий управление задержкой формирования ресурсных блоков. Таким образом, на физическом уровне при использовании одного и того же радиочастотного диапазона с точки зрения малой задержки в обоих режимах работы интерфейса PC5 предпочтительнее выглядит вариант NR-V2X, причем ориентировочная оценка этого преимущества составляет соотношение используемого разноса поднесущих. Однако не следует забывать о негативном проявлении эффекта Доплера при расширении полосы ресурсного блока при нумерологиях высокого порядка.

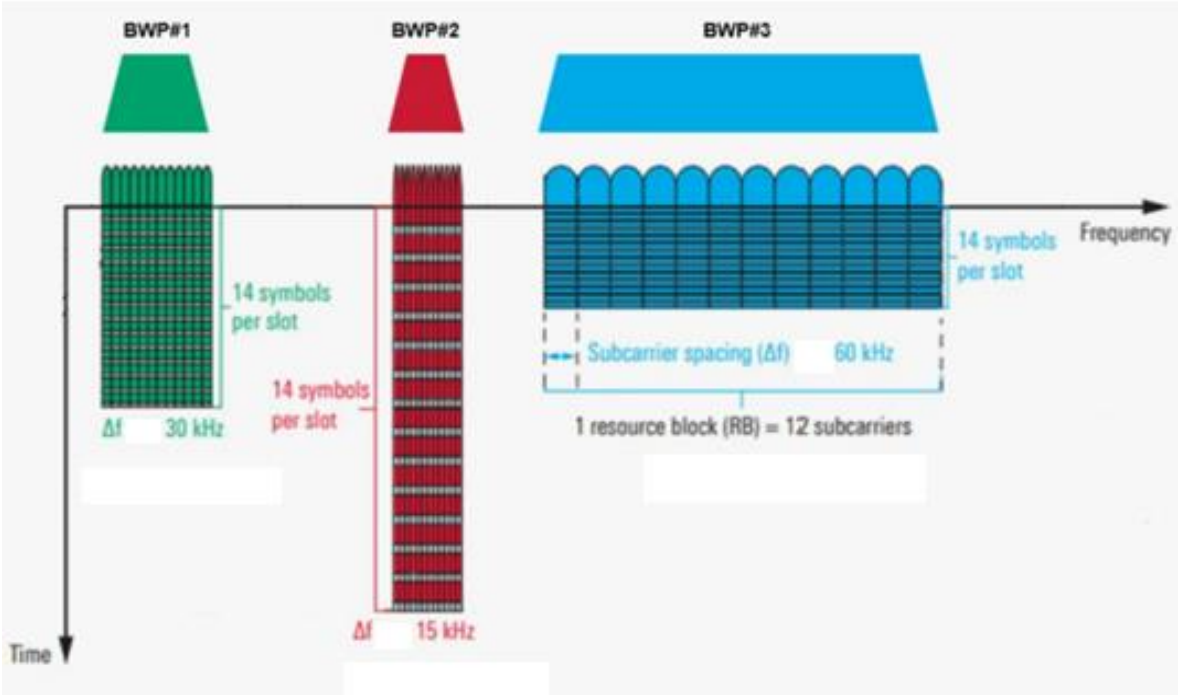


Рис. 2. Возможности снижения задержки вариативной нумерологией

Рассматривая другую технологическую возможность непосредственной связи VANET – DSRC, следует в первую очередь отметить ее независимость от наличия сетевой инфраструктуры. Данный вариант обеспечивается заложенной в линейку стандартов IEEE 802.11 возможностью работы без инфраструктуры – на основе Ad-Hock режима. Однако это может служить источником опасности для обеспечения низкой задержки на канальном уровне, учитывая особенности соответствующего протокола MAC. Оставаясь в рамках использования CSMA протокола канального уровня сетей Wi-Fi в той или той модификации трудно рассчитывать на существенный выигрыш в снижении задержки (необходимость ACK, задержки процесса конкурентного доступа и высокая вероятность коллизий с необходимостью повторной передачи). Значимым ресурсом для снижения задержки в данном случае выступает физический слой – вариативная нумерология OFDM, использование разделения радиочастотного ресурса – OFDMA, повышение индекса модуляции. Данные возможности нашли отражение как в общей линейке развития стандартов Wi-Fi, так и в решениях IEEE для VANET. Важное значение имеет выделение рядом национальных регуляторов полосы 75 МГц нелицензируемого диапазона U-NII-4 (5.850м…5.925 ГГц) для целей DSRC/ITS. Значение для формирования задержки имеет использование половинной тактовой частоты (half clocking) [3]. Это сокращает полосу пропускания с 20 МГц до 10 МГц, что снижает негативный эффект доплеров-

ского сдвига частот из-за высокой скорости движения транспортных средств, однако вдвое увеличивает длительность символа OFDM. В таблице 1 в наиболее концентрированном виде приведены технические характеристики, позволяющие обоснованно судить о DSRC на базе двух стандартов [4]: IEEE 802.11p и IEEE 802.11bd. Приведенные данные явно указывают на возможное примерно двукратное снижение задержки при использовании IEEE 802.11bd, равно как и лучшее противодействие эффекту Доплера при высокоскоростном движении.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение технологий DSRC

Характеристика	802.11p	802.11bd
Рабочие диапазоны частот	5.9 ГГц	5.9 ГГц и 60 ГГц
Кодирование канала	BCC	BCC и LDPC
Повторные передачи	Отсутствуют	Зависит отперегрузки
Меры против Доплероского сдвига	Отсутствуют	Мидамбулы
Разнос поднесущих	156.25 кГц	312.5 кГц, 156.25 кГц, 78.125 кГц
Поддерживаемые относительные потоки	252 км/ч	500 км/ч
Пространственные	Один	Несколько

Выводы и перспективы

Исследованные в работе технологии (таблица 2) обеспечения низкой задержки, формируемой в слое PHY, указывают на различия в характере их использования. Так C-V2X представляется предпочтительным в условиях высокой плотности транспорта – в городских условиях, а DSRC – на высокоскоростных магистралях, где скорость движения транспортных средств друг относительно друга невелика, сотовое покрытие отсутствует. Однако окончательное и более детальное суждение о предпочтительности для различных условий следует основывать на совокупном анализе влияния на задержку как физического, так и канального слоев.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение технологий V2X

Параметр	DSRC		C-V2X	
	IEEE 802.11p	IEEE 802.11bd	LTE	5G NR
Частотный диапазон	5.9 ГГц	5.9 ГГц и 60 ГГц	30 ГГц-300ГГц	5.9 ГГц и 60 ГГц
Полоса канала	10 МГц	10 МГц и 20 МГц	10 МГц и 20 МГц	До 100 МГц
PHY	OFDM	OFDM	SC-FDM	OFDM
Модуляция	BPSK, QPSK, 16/64-QAM	BPSK-DCM, BPSK, QPSK, 16/64/256-QAM	Rel.14: QPSK, 16-QAM Rel.15:64-QAM	QPSK, 16/64-QAM
Канальное кодирование	BCC	BCC и LDPC	Турбо-код	LDPC
Поднесущих на ресурсный блок	Нет	Нет	12	12
Символов на ресурсный блок	Нет	Нет	14	14
Разнос поднесущих	156,25 кГц	312.5 кГц, 156.25 кГц, 78.125 кГц	15 кГц	sub-6 ГГц: 15, 30, 60 кГц; mmWave: 60, 120 кГц
Длительность символа	8 мкс	8 мкс	71 мкс	71 мкс
Задержка	~0,4 мс	~0,4 мс	~1 мс	~1 мс

Список используемых источников

1. Mohammad T. Kawser, Md. Saymon Fahad, Sakib Ahmed, S. Safwan Sajjad, and Hasib A. Rafi. The Perspective of Vehicle-to-Everything (V2X) Communication towards 5G // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. 2019. N 4. C.146-155.

2. Li, Guangjie, Chengjie Qin, and Bing Wang. A cooperative relaying approach for emergency message delivery in VANETs // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 16. 2015. N 4. C.2074-2085.

3. Thelidela Nageswaramma, Manoj Eknath Pati. A Comprehensive Review on Vehicular Ad Hoc Network: Applications, Challenges and Opportunities // International Journal of Computer Applications Technology and Research. 2025. V 14. C130-135.

4. Gaurang naik, Biplav Choudhury, and Jung-Min Park. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications // Multidisciplinary Rapid Review Open Access Journal. 2019. V 9. C.70169-70184.

RESEARCH ON LOW-LATENCY TECHNOLOGIES FOR APPLICATIONS IN AUTONOMOUS VEHICLES

Korotin V., Pham Van Bach
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Alongside the rapid development of modern technologies, autonomous vehicles are becoming an inevitable trend of the future due to the practical advantages they offer. More than 90 % of road traffic accidents occur as a result of human factors. Autonomous vehicles provide 360-degree awareness, respond faster and more accurately, and are capable of more effectively preventing collisions and minimizing human casualties. This technology enables optimization of vehicle speed and inter-vehicle distance, coordination of intelligent traffic flows, and ensures smooth transportation. Passengers can work, relax, or entertain themselves instead of focusing on driving, which is particularly beneficial in dense urban traffic or on long highways. It also creates opportunities for independent mobility for elderly people and individuals with disabilities. Therefore, research on V2X (Vehicle-to-Everything) technologies within intelligent transportation systems is of significant importance. One of the objectives of this study is a comparative analysis of possible radio access technologies for such systems.

Key words: ITS, 5G-NR, V2X, C-V2X, DSRC

УДК 004.02 +519.23
ГРНТИ 50.05+27.43.51

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АНАЛИЗЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

П. В. Косов, Р. Я. Лабковская

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается применение нейросетевых технологий для упрощения ключевых задач анализа больших данных через призму доступных Python-библиотек. В работе описываются возможности для решения таких задач как предобработка данных, кластеризация, классификация, прогнозирование и обнаружение аномалий. Для каждой задачи выделены бесплатные специализированные библиотеки, ядро которых составляют нейронные сети.

большие данные, Python, библиотеки Python, нейросетевые технологии, кластеризация, классификация, прогнозирование, обнаружение аномалий

Традиционные методы анализа данных часто требуют ручного подбора признаков и сложной настройки, однако нейросетевые технологии позволяют автоматически извлекать различные зависимости, что делает их мощным инструментом для решения широкого круга задач [1]. Однако выбор подходящей библиотеки может быть затруднен из-за их обилия.

Целью работы является описание возможностей для решения фундаментальных задач анализа больших данных при помощи бесплатных специализированных библиотек Python, ядро которых составляют нейронные сети.

Предобработка данных

Предобработка неструктурированных данных является критически важным этапом анализа данных и напрямую влияет на качество результата. В задачах глубокого обучения часто необходимо совершать предобработку данных, включая аугментацию, извлечение признаков и комбинирование данных из нескольких источников. Для решения подобных задач удобно использовать подходы на основе конвейеров данных [2].

Одной из библиотек, упрощающих этот процесс, является библиотека Cleanlab. Она используется для оценки качества меток и выявления экзем-

пляров с некорректной разметкой. Позволяет обрабатывать датасеты, не помещающиеся в оперативную память, и поддерживает различные типы данных: изображения, текст, табличные данные, аудио. Эффективность библиотеки снижается при наличии в выборке классов с малым количеством примеров, так как перестает видеть в них аномалии. Также для корректной работы необходимо разбить данные на части так, чтобы прогноз для каждого примера делала модель, которая этот пример еще не видела.

Другим удобным инструментом является библиотека Datawig. Данная библиотека, в отличие от Cleanlab, представляет собой «умный заполнитель» пропущенных значений, поддерживающая как категориальные, так и числовые колонки. Функции *SimpleImputer.complete()* позволяет программе автоматически найти ошибки без дополнительных разъяснений: она самостоятельно найдет все пустые клетки, определит тип данных и вставит наиболее вероятное значение. К недостаткам стоит отнести высокие требования к вычислительным ресурсам. При анализе небольших датасетов проигрывает по скорости другим методам при незначительном выигрыше в качестве.

Еще одна из библиотек, помогающих на данном этапе, – mPyPl. Это отечественная библиотека, реализующая функциональный подход к обработке данных на основе именованных индексируемых потоков. Она позволяет обрабатывать данные только в момент запроса к ним. Поддерживает три стратегии управления памятью: немедленное вычисление, ленивое с кэшированием и вычисление по требованию. К недостаткам можно отнести высокий порог вхождения. Инструмент ориентирован на задачи глубокого обучения и может быть избыточен для простых операций [2].

Классификация

Классификация объектов является еще одной задачей, в которой нейросети показывают выдающиеся результаты. Нейросети являются стандартом для классификации изображений, текстов и сложных структурированных данных [3].

Одной из нейросетевых библиотек, помогающих в данной области, является Fastai. Данная библиотека сильно упрощает создание современных моделей классификации для изображений, текстов и таблиц. Она автоматически реализует подбор скорости обучения и эффективные стратегии дообучения предобученных моделей. Позволяет достигать высокой точности

в классификации с минимальной длиной кода, что сокращает порог вхождения.

Для работы с текстом главным индустриальным стандартом является библиотека Transformers. Библиотека объединяет три компонента: параметры, структуру и обработку текста. Метод *from_pretrained()* позволяет моментально загружать любую известную нейросеть. Имеются готовые шаблоны для быстрой работы, а для глубоких исследований есть прямой доступ к механизмам внимания и внутренним слоям.

В работе с табличными данными поможет библиотека TabNet, архитектура которой специально разработана для данной задачи. Библиотека использует механизм внимания, имитирующий построение дерева решений, и предоставляет интерпретируемые маски признаков, показывающие, на какие входные характеристики модель обращала внимание при принятии решения. Поддерживает как классификацию, так и регрессию.

Кластеризация

Нейросети позволяют находить нелинейные зависимости и кластеризовать данные в пространстве признаков, полученном из скрытых слоев. Различные виды нейронных сетей имеют свои сферы применения, и кластеризация является одной из важных задач интеллектуального анализа данных [1].

Библиотека UMAP позволяет обнаружить кластеры объектов в исходных данных на графике, однако требует предварительного вычисления k ближайших соседей и инициализации внешними библиотеками. Может работать с большими наборами данных, но не может поддерживать разреженные матрицы.

Другой библиотекой для кластеризации является Deep Embedded Clustering. В данной библиотеке нейросеть учится специально под кластеризацию. При обнаружении объекта «между» группами, она изменяет свои веса таким образом, чтобы на следующем круге объект ближе относился к одной из групп [4]. Находит более логичные закономерности чем метод k ближайших соседей, но выполняется медленнее и склонна к переобучению.

Прогнозирование временных рядов

Для прогнозирования будущих значений нейросети вытесняют классические модели благодаря способности учитывать сложные сезонности и длинные зависимости.

Библиотека Darts унифицирует работу с разными моделями временных рядов: от классической статистики до глубокого обучения. Поддерживает многомерные данные и ковариаты. Аналитика включает встроенные инструменты для проверки модели на прошлых данных и объединения нескольких моделей для точности.

Другой библиотекой для прогнозирования является NeuralProphet, объединяющая в себе декомпозицию и нейронные сети. Сочетает в себе понятность модели с выделением тренда, сезонности и праздников с мощностью нейросетей для учета автокорреляции. Библиотека позволяет настраивать архитектуру сети и автоматически подбирать гиперпараметры [2].

Обнаружение аномалий

Нейросети способны находить аномалии в данных, которые не обнаруживаются статистическими методами. Библиотекой с более чем 30 алгоритмами обнаружения аномалий является PyOD. Инструментарий охватывает широкий спектр методов: от классических статистических подходов до передовых архитектур глубокого обучения. Библиотека автоматизирует вспомогательные процессы, предлагая встроенные средства для визуализации результатов и количественной оценки качества детекции. Несмотря на высокую точность в поиске скрытых зависимостей, эти методы критичны к объему обучающей выборки и требуют значительных вычислительных мощностей.

Заключение

Нейросетевые библиотеки на Python значительно упрощают процесс анализа данных, автоматизируя выделение признаков и предлагая готовые архитектуры для сложных задач [1, 3]. Однако их применение требует осознанного подхода и понимания требований к формату данных и вычислительным ресурсам [4]. На основе данной работы аналитику будет проще выбрать оптимальный инструмент для его конкретной задачи, избегая как неоправданного усложнения, так и использования устаревших методов там, где нейросети дают качественный скачок.

Список используемых источников

1. Цуканова Н. И. Программирование глубоких нейронных сетей на языке Python: учебное пособие / Цуканова Н. И. М.: КУРС, 2025. 220 с.

2. Сошников Д. В. Библиотека mPyPl: функциональный подход к обработке данных в глубоком обучении / Сошников Д. В. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 5. 104 с

3. Малов Д. А. Глубокое обучение и анализ данных. Практическое руководство / Малов Д. А. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2024. 272 с.

4. Лабковская Р. Я. Анализ больших данных / Р. Я. Лабковская, П. В. Косов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора Бонч-Бруевича, 2025. 152 с.

APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN BIG DATA ANALYSIS

Kosov P., Labkovskaya R.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper examines the use of neural network technologies to simplify key big data analysis tasks through the lens of available Python libraries. It describes the capabilities for solving problems such as data preprocessing, clustering, classification, forecasting, and anomaly detection. Free, specialized libraries with neural networks at their core are identified for each task.

Key words: big data, python, python libraries, neural network technologies, clustering, classification, forecasting, anomaly detection

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MATLAB RF BLOCKSET В ЗАДАЧЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДИСКАЖЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ 5G/6G

Е. В. Кравец, Н. Д. Пигарев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматриваются методы цифрового предыскажения усилителей мощности для широкополосных передатчиков систем пятого и шестого поколений. Разработана модель передающего тракта в среде MATLAB и выполнено сравнительное моделирование полиномиальной, нейросетевой и гибридной структур предыскажения. Оценка проводится по уровню внеполосных излучений. Показано, что гибридный алгоритм обеспечивает наиболее эффективное подавление спектральной регенерации.

цифровое предыскажение, полиномиальная модель с памятью, нейросетевой предыскатель, гибридный алгоритм, уровень внеполосных излучений.

Развитие систем подвижной радиосвязи 5G/6G сопровождается расширением полосы и использованием многонесущих сигналов с высоким пик-фактором, что усиливает проявление нелинейности усилителей мощности и приводит к росту внеполосных излучений. Для повышения линейности передающего тракта применяется цифровое предыскажение [1], включая полиномиальные модели с памятью и нейросетевые подходы [2]. Цель работы – реализовать и сравнить модели цифрового предыскажения усилителя мощности в среде MATLAB по эффективности подавления внеполосных излучений [3, 4].

1. Постановка задачи и структура моделируемой системы

В рамках исследования рассматривается задача цифрового моделирования передающего тракта системы подвижной радиосвязи пятого поколения с целью анализа эффективности различных алгоритмов цифрового предыскажения усилителя мощности.

Моделируемая система включает следующие функциональные блоки, также система представлена на рис. 1:

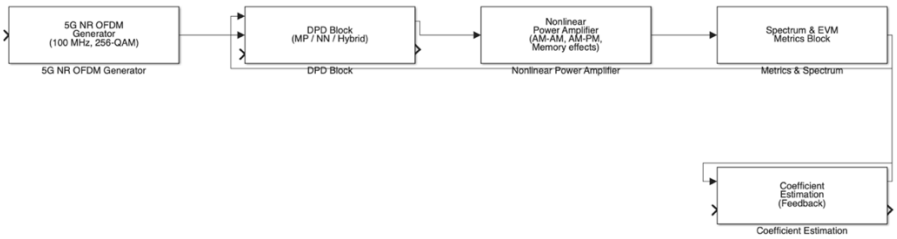


Рис. 1. Моделируемая система в MATLAB

В среде MATLAB RF Blockset реализуется сквозная модель, в которой цифровой OFDM-сигнал формируется на комплексной базовой полосе, после чего проходит через блок предыскажения и поведенческую модель усилителя мощности. В качестве тестового сигнала используется широкополосный 5G NR-подобный сигнал со следующими параметрами таблица 1:

ТАБЛИЦА 1. Параметры тестового сигнала

Параметр	Значение
Стандарт сигнала	5G NR (FR1)
Тип модуляции	256-QAM
Метод мультиплексирования	OFDM
Полоса сигнала	100 МГц
Разнос поднесущих	30 кГц (типовой для NR)

2. Алгоритмы цифрового предыскажения

В качестве базового алгоритма цифрового предыскажения используется полиномиальная модель с памятью (Memory Polynomial, MP), формирующая предыскаженный сигнал согласно [5, 6] (1)

$$x_{DPD}(n) = \sum_{m=0}^{M} \sum_{k=0}^{K} a_{k,m} x(n-m)|x(n-m)|^k \qquad (1)$$

где K – порядок нелинейности, M – глубина памяти,

Нейросетевой DPD трактует предыскажение как задачу аппроксимации нелинейного оператора усилителя с памятью. В работе используется многослойный перцептрон, на вход которого подаются действительная и мнимая части текущего и задержанных отсчетов сигнала, а на выходе формируется комплексный предыскаженный сигнал (через два выхода для I и Q). Такая модель позволяет учитывать нелинейность и эффекты памяти без явного задания полиномиального базиса, однако требует настройки гиперпараметров и характеризуется большей вычислительной сложностью по сравнению

с MP. Также реализована гибридная структура, объединяющая полиномиальную и нейросетевую компоненты. Структура гибридного предыскажителя приведена на рис. 2.

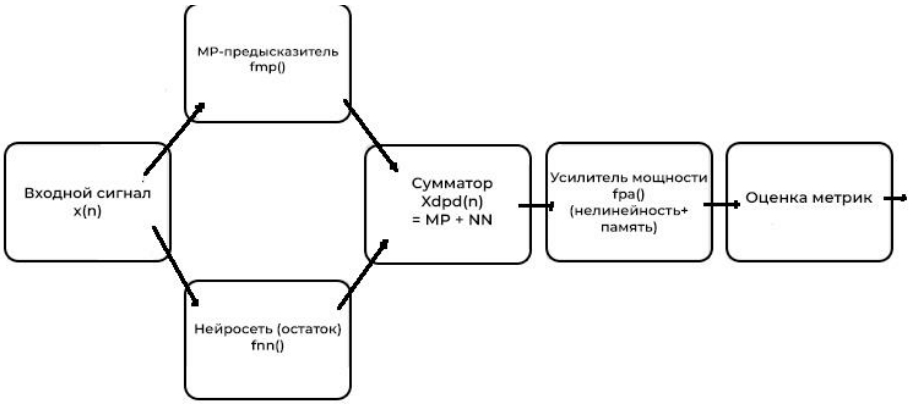


Рис. 2. Структура гибридного цифрового предискажения

Применение гибридной схемы позволяет сократить размер нейросетевой модели по сравнению с полностью нейросетевым DPD и одновременно повысить точность компенсации по сравнению с использованием только полиномиальной модели.

3. Методика моделирования и результаты

Моделирование выполнено в MATLAB с использованием RF Blockset и 5G Toolbox [7, 8]. Сквозная модель включала генерацию 5G NR OFDM-сигнала (100 МГц, 256-QAM), блок цифрового предыскажения и поведенческую модель усилителя мощности с эффектами памяти; во всех экспериментах параметры сигнала и условия сравнения фиксировались. В базовом режиме без DPD после усилителя наблюдается спектральная регенерация; на рис. 3 приведен спектр выходного сигнала, при этом получено ACPR approx -11.018 дБ, что подтверждает актуальность применения алгоритмов линеаризации для широкополосных сигналов.

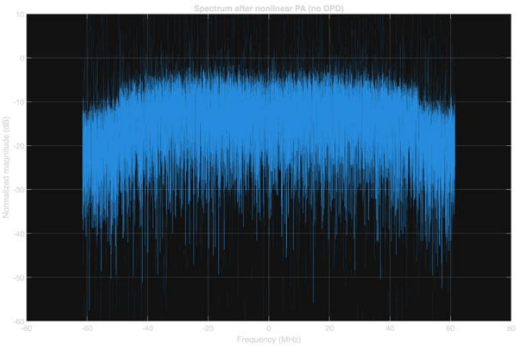


Рис. 3. Спектр сигнала после нелинейного ПА без DPD

Для оценки эффективности MP-DPD выполнено сравнение спектральных характеристик сигнала после усилителя мощности без предыскажения и с применением полиномиального предыскажителя. При фиксированном входном back-off 8 дБ параметры подбирались по критерию минимизации ACPR; оптимальным выбран вариант K = 4, M = 1.

Видно, что применение полиномиальной модели приводит к снижению уровня внеполосных излучений и частичному подавлению регенерации спектра. Количественные результаты приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты для базового случая и MP-DPD

Метод	K	M	ACPR, дБ	Улучшение, дБ
Без DPD	-	-	-11.018	0
MP-DPD	4	1	-11.241	+1.31

Нейросетевая модель цифрового предыскажения реализована на основе многослойного перцептрона с двумя скрытыми слоями по 32 нейрона и глубиной памяти входного вектора M = 1, что обеспечивает сопоставимость с полиномиальной моделью. Моделирование выполнено при фиксированных условиях: OFDM-сигнал 100 МГц с модуляцией 256-QAM, входной back-off 8 дБ и идентичная поведенческая модель усилителя мощности; обучение осуществлялось в косвенной архитектуре (ILA) с минимизацией среднеквадратичной ошибки. В базовом режиме получено ACPR = -11.018 дБ, применение NN-DPD обеспечивает ACPR = -11.311 дБ;

На основании полученных результатов реализована гибридная структура цифрового предыскажения, в которой полиномиальная модель с памятью компенсирует основную часть нелинейных искажений, а нейросетевая модель корректирует остаточную ошибку. Применение гибридного алгоритма MP+NN обеспечивает снижение уровня внеполосных излучений до ACPR = −14.819 дБ; сравнение спектров приведено на рис. 4, а результаты сопоставления методов – в таблице 3.

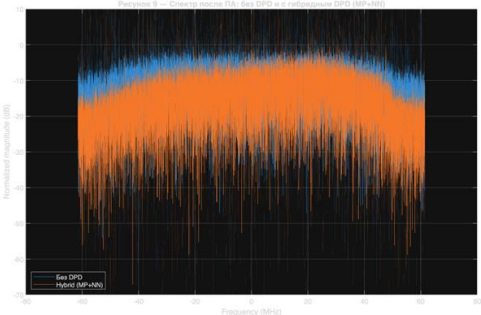


Рис. 4. Спектр сигнала после усилителя мощности: без DPD и с гибридным DPD

ТАБЛИЦА 3. Сравнение алгоритмов цифрового предыскажения

Метод	Параметры	ACPR, дБ	Улучшение, дБ
без DPD	-	-11.018	0
MP-DPD	K = 4, M = 1	-11.241	+0.223
NN-DPD	M=1	-11.311	+0.293
Hybrid (MP + NN)	MP: K=4, M=1 + NN: 16–16, M=1	-14.819	+3.801

Таким образом, гибридный подход обеспечивает наиболее выраженное подавление внеполосных излучений за счет сочетания интерпретируемой полиномиальной компенсации и гибкой нейросетевой коррекции остаточных искажений.

Заключение

В среде MATLAB RF Blockset выполнено сравнение алгоритмов цифрового предыскажения для OFDM-сигнала (100 МГц, 256-QAM): без DPD получено ACPR = −11.02 дБ, MP-DPD (K = 4, M = 1, ILA) улучшает до −12.54 дБ, NN-DPD – до −11.31 дБ, а лучший результат обеспечивает гибрид MP+NN – ACPR = −14.82 дБ (≈ +3.8 дБ к базовому). Показано, что гибридный подход наиболее эффективно снижает внеполосные излучения при умеренной вычислительной сложности и перспективен для систем 5G/6G.

Список используемых источников

1. Morgan D. R., Ma Z., Kim J., Zierdt M., Pastalan J. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers // IEEE Transactions on Signal Processing. 2006. Vol. 54, No. 10. P. 3852–3860.

2. Isaksson M., Wisell D., Rönnow D. Comparative analysis of behavioral models for RF power amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54, No. 1. P. 348–359.

3. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation. Release 15–17 / 3rd Generation Partnership Project. – URL: https://www.3gpp.org/ (дата обращения: 31.01.26).

4. Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Шлома А. М. Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений. М.: Горячая линия – Телеком, 2021.

5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.

6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989.

7. RF Blockset User’s Guide. – Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2024. 484 p. URL: https://www.mathworks.com/help/rfblockset/ (дата обращения: 12.09.2025).

8. 5G Toolbox User’s Guide. – Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2024. 960 p. URL: https://www.mathworks.com/help/5g/ (дата обращения: 12.09.2025).

APPLICATION OF MATLAB RF BLOCKSET FOR DIGITAL PREDISTORTION MODELING OF POWER AMPLIFIERS IN 5G/6G SYSTEMS

Kravec E., Pigarev N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers digital predistortion methods for wideband power amplifiers in fifth- and sixth-generation wireless communication systems. A transmitter model based on a 100 MHz orthogonal frequency-division multiplexing signal is developed in MATLAB. Polynomial, neural network, and hybrid predistortion structures are implemented and compared in terms of adjacent channel power ratio. The results show that the hybrid approach provides the most efficient suppression of spectral regrowth compared to standalone polynomial and neural network methods.

Key words: digital predistortion, power amplifier, wideband signal, orthogonal frequency-division multiplexing, memory polynomial, neural network predistorter, hybrid algorithm, adjacent channel power ratio

УДК 621.396.4
ГРНТИ 50.37.03

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЦИФРОВОГО КОНТЕНТА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УРОВНЯ КОРПОРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ

Е. С. Крюкова, И. Б. Паращук, В. Б. Цыпнятов

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены современные инфокоммуникационные технологии и системы с функциями корпоративных электронных библиотек, позволяющие обеспечить доступ обучаемых и педагогов к цифровым образовательным ресурсам. Проанализированы современные трактовки понятия и виды нежелательной информации, которая может иметь место на ресурсах электронных библиотек такого класса. Проведен анализ и предложены элементы научно-методического обеспечения для построения и функционирования специальных программно-аппаратных средств интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента в целях эффективного обнаружения и гарантированного оперативного противодействия нежелательной информации в инфокоммуникационных системах уровня корпоративных электронных библиотек.

электронная библиотека, инфокоммуникационная система, нежелательная информация, цифровой образовательный контент, обнаружение, метод, модуль

Применение инфокоммуникационных сетей, систем и технологий в среде отечественных и зарубежных науки и образования, стимулирует активное развитие средств и комплексов обучения с использованием электронных образовательных продуктов, способствует развитию дистанционных образовательных технологий в помощь педагогам и учащимся. На переднем крае развития подобных инфокоммуникационных сетей и систем находятся технологии обеспечения беспрепятственного и оперативного доступа профессорско-преподавательского состава и обучаемых к ресурсам общедоступных и корпоративных (вузовских) электронных библиотек (ЭБ) и отдельным электронным изданиям для решения задач, относящихся к научно-исследовательской и образовательной деятельности [1, 2].

Инфокоммуникационные системы уровня (типа) корпоративных ЭБ, представляют собой программно-аппаратные средства и комплексы, способные предоставить пользователю беспрепятственный и оперативный до-

ступ к коллекции (фонду) электронных текстовых и мультимедийных документов: учебников, художественных и документальных книг, статей, словарей, справочников, аудиокниг, тестов, записей вебинаров и лекций в видеоформате, а также иных цифровых материалов для обучения и эффективной научно-исследовательской деятельности [3, 4].

Корпоративные ЭБ создаются на базе специального программного обеспечения, позволяющего управлять контентом и пользователями, они замечательно способствуют процессам обучения штатных работников и делают поддержку получения знаний непрерывной и персональной (подборки электронных материалов, соответствующие потребностям конкретных сотрудников), доступной в любое время.

Подобные инфокоммуникационные объекты обеспечивают сбор, систематизированное хранение и обработку цифрового контента, нацеленного на задачи обучения, обеспечивают информационную поддержку при повышении квалификации сотрудников, давая дополнительную возможность для эффективного хранения, структурирования и упорядочивания знаний, так или иначе связанных с деятельностью этой конкретной корпорации.

При этом под цифровым контентом корпоративных ЭБ традиционного понимается смысловое наполнение или фактическое содержание какого-либо информационного образовательного ресурса, хранящегося или обрабатываемого в этой библиотеке: текста, графики, музыки, видео [5, 6].

Очевидно, что безопасность подобного образовательного контента, его «безвредность» – неспособность причинить урон моральному, либо иному другому, аспекту здоровья пользователя, должна лежать во главе угла всех мероприятий, осуществляемых организаторами образовательного процесса и сетевыми администраторами, поддерживающими функциональные процедуры в рамках корпоративных ЭБ.

Речь идет о непрерывном поиске, безусловном обнаружении и гарантированном устранении из электронного информационного образовательного ресурса всей нежелательной информации.

Нежелательная информация (НИ), случайно или намеренно попавшая в образовательный цифровой контент, размещаемый на ресурсах корпоративной ЭБ, способна нанести значимый вред человеку, обществу и стране в целом, она представляет собой умышленно искаженные или недостоверные данные, смысл и содержание которых направлены на разрушение общественного согласия, духовных и нравственных ценностей общества, либо на возбуждение религиозной или национальной розни, социальной вражды.

Это, по сути, массив сведений, которые могут причинить ущерб, являются лживыми, не отвечают традиционным моральным или правовым нормам (устоям), либо вредоносны для конкретной группы обучаемых, например, несовершеннолетних.

К основным видам НИ, которая может, но не должна попасть на ресурсы корпоративной ЭБ, относят:

– противоправный и законодательно запрещенный к распространению (неразрешенный) контент;
– материалы экстремистского характера, оправдывающие насилие и агитирующие за разжигание ненависти или вражды – национальной, религиозной или расовой;
– откровенно сексуальный контент и детская порнография;
– популяризация наркотиков или суицидальных действий;
– ложная (недостоверная) информация, способная вводить в заблуждение или причинять вред; дезинформация – очевидно и изначально ложная информация (фейки), заведомо распространяемая с целью обмана;
– буллинговая или троллинговая (негативная, унижающая для личности) информация – материалы, которые могут нанести ущерб репутации или достоинству конкретного человека или группы лиц;
– персональная информация конфиденциального характера – персональные данные, реквизиты финансового плана, личная, медицинская или семейная тайна, распространенные без согласия их владельца, а также спам и материалы, содержащие шокирующий контент (например, акты насилия) [7, 8].

В этой связи актуальными, на наш взгляд, оказываются вопросы, призванные обеспечить разработку научно-методического обеспечения для построения и функционирования специальных программно-аппаратных средств интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента в целях эффективного обнаружения и гарантированного оперативного противодействия НИ в инфокоммуникационных системах уровня корпоративных ЭБ.

Предполагается, что построение таких специальных программно-аппаратных средств для обработки цифрового образовательного контента на ресурсах ЭБ, будет основываться на интегративном и сопряженном применении комплекса взаимоувязанных и синхронизированных по времени и задачам методов и средств:

– методов управления политикой безопасности электронной библиотеки;

– методов интеллектуального анализа данных;
– алгоритмов и программных инструментов обработки Больших Данных;
– методов и средств анализа семантики контента;
– алгоритмов обнаружения угроз;
– методов предварительной оценки репутации источников контента и учета результатов проактивного анализа контекста;
– методов машинного обучения в интересах кластеризации и классификации, а также методов визуализации образовательной информации [8-11].

Опираясь на ранее проведенные исследования, касающиеся защиты цифрового сетевого контента, предлагается разделить задачу построения таких специальных программно-аппаратных средств для интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента на ресурсах ЭБ, на отдельные модули, в соответствии со звеньями (рангами) архитектуры подобных систем, но с учетом специфики борьбы с НИ на ресурсах инфокоммуникационных систем уровня (типа) корпоративных ЭБ [8, 11].

В состав таких базовых, фундаментальных модулей, составляющих «скелет» архитектуры специальных программно-аппаратных средств для интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента на ресурсах ЭБ в интересах обнаружения НИ, по нашему мнению, могут и должны войти:
– модуль сбора и предобработки данных о признаках НИ в цифровом образовательном контенте на ресурсах ЭБ;
– модуль оценки семантики контента в интересах поиска признаков НИ;
– модуль поиска и выбора подходов и практических инструментов эффективного обнаружения и гарантированного оперативного противодействия НИ в инфокоммуникационных системах уровня корпоративных ЭБ.

Помимо основных модулей, составляющих фундамент архитектуры средств для интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента на ресурсах ЭБ в интересах обнаружения НИ, в состав подобных средств необходимо включить дополнительные модульные блоки, напрямую нацеленные на аналитическую обработку подобного контента: модульный блок распределенных интеллектуальных сканирующих устройств (интеллектуальных парсеров); модульный блок многокритериального оценивания и категоризации признаков НИ в цифровом образовательном контенте на ресурсах ЭБ; модульный блок адаптации и переобучения специальных программно-аппаратных средств для интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента на ресурсах ЭБ в интересах обнаружения

НИ; модульный блок выработки и выбора мер оперативного противодействия НИ в инфокоммуникационных системах уровня корпоративных ЭБ; модульный блок реализации визуальных интерфейсов для предварительного просмотра образовательной информации в рамках поиска нежелательной информации.

В итоге планируется получить не только основы концепции построения архитектуры интеллектуальных систем аналитической обработки цифрового образовательного контента ЭБ для эффективного обнаружения и противодействия нежелательной информации, но и осуществить разработку методов, моделей, методик, алгоритмов, архитектур и программных прототипов двух инновационных компонентов – модуля сбора и предобработки данных о признаках НИ в цифровом образовательном контенте на ресурсах ЭБ и модуля распределенных интеллектуальных сканирующих устройств (интеллектуальных парсеров).

Таким образом, проанализированы современные инфокоммуникационные технологии и системы с функциями корпоративных электронных библиотек, позволяющие обеспечить доступ обучаемых и педагогов к цифровым образовательным ресурсам. Рассмотрены современные трактовки понятия и виды нежелательной информации, которая может иметь место на ресурсах электронных библиотек такого класса. Проведен анализ и предложены элементы научно-методического обеспечения для построения и функционирования специальных программно-аппаратных средств интеллектуальной обработки цифрового образовательного контента в целях эффективного обнаружения и гарантированного оперативного противодействия нежелательной информации в инфокоммуникационных системах уровня корпоративных электронных библиотек.

Список используемых источников

1. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57723-2017. Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Системы электронно-библиотечные. Общие положения. М.: Стандартинформ. 2018. 16 с.

2. Паращук И. Б., Крюкова Е. С. Особенности развития современных электронных библиотек и анализ подходов к оцениванию их качества // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение. 2019. С. 34–36.

3. Митин В. А. Электронная корпоративная библиотека как инструмент развития сотрудников // itWeek. 2020. URL: https://www.itweek.ru/management/article/detail.php?ID=176181 (дата обращения: 23.11.2025).

4. Паращук И. Б., Крюкова Е. С., Ясинский С. А. Временная и топологическая доступность пользователей к информационному ресурсу электронных библиотек: показа-

тели и критерии оценивания в рамках системных исследований // Труды ЦНИИС. С-Петербургский филиал. Научно-технический сборник статей. Т.1. № 9. 2020. С. 8–16.

5. Гуров В. Н., Богомазова А. Е. Цифровой образовательный контент: педагогический взгляд на сущность и структуру // KANT. 2024. № 4 (53). С. 379–384.

6. Паращук И. Б., Крюкова Е. С. Контент электронных образовательных ресурсов как инновационная среда подготовки военных и инженерно-технических кадров // Военная безопасность России: взгляд в будущее: Материалы 8-й Международной межведомственной научно-практической конференции научного отделения № 10 РАРАН. Москва, 16 марта 2023 года: ФГБУ «РАРАН», ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», ФГКВОУ ВО «Военная академия ГШ ВС РФ». М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. Т.2. С. 182–187.

7. Недель А. Ю., Фанайлова Е. Н. Нежелательный контент: политическая власть в эпоху возникновения новой антропологии. СПб.: Изд-во Алетейя. 2021. 263 с.

8. Котенко И. В., Саенко И. Б., Браницкий А. А., Паращук И. Б., Гайфулина Д. А. Интеллектуальная система аналитической обработки цифрового сетевого контента для защиты от нежелательной информации // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). Вып. 20(4), 2021. С. 755–792.

9. Татарникова Т. М. Интеллектуальный анализ данных. СПб.: Инфра-Инженерия. 2024. 172 с.

10. Замятин А. В. Интеллектуальный анализ данных. Томск: Томский государственный университет. 2020. 195 с.

11. Котенко И. В., Паращук И. Б. Общая архитектура интеллектуальной системы аналитической обработки цифрового сетевого контента в интересах защиты от нежелательной информации // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2018). СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 501–505.

INTELLIGENT PROCESSING OF DIGITAL CONTENT FOR THE EFFECTIVE DETECTION OF UNWANTED INFORMATION IN INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS AT THE CORPORATE ELECTRONIC LIBRARY LEVEL

Kryukova E.S., Parashchuk I.B., Tsypnyatov V.B.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This article examines modern information and communication technologies and systems with corporate digital library functionality, enabling students and teachers to access digital educational resources. It also analyzes current understandings of the concept and types of unwanted information that may reside on the resources of these digital libraries. It also analyzes and proposes elements of scientific and methodological support for the development and operation of specialized software and hardware for intelligent processing of digital educational content, enabling the effective detection and guaranteed prompt counteraction of unwanted information in corporate digital library-level information and communication systems.

Key words: electronic library, information and communication system, unwanted information, digital educational content, detection, method, module

УДК 004.891.2
ГРНТИ 50.11.35

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОБСЛУЖИВАНИЯ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЯХ

М. А. Маколкина, В. Д. Михайлов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Самоорганизующиеся сети требуют новых подходов к обеспечению QoS. В статье исследуется применение глубокого обучения с подкреплением DRL для создания автономных систем управления. DRL-агенты способны обучаться оптимальной адаптивной настройке параметров сети. Таких как: маршрутизация, распределение ресурсов в реальном времени, преодолевая ограничения традиционных методов. Рассмотрены архитектуры DRL, ключевые вызовы: масштабируемость и варианты реализации. Делается вывод о высоком потенциале DRL для построения интеллектуальных и устойчивых сетей будущего.

самоорганизующиеся сети, глубокое обучение с подкреплением, качество обслуживания, Марковский процесс принятия решений, мультиагентное обучение

Эволюция телекоммуникационных сетей движется в сторону полной автономии, гибкости и адаптивности. Самоорганизующиеся сети, являющиеся основой концепций сетей следующего поколения и за их пределами, должны самостоятельно настраиваться, оптимизироваться и восстанавливаться. Ключевым аспектом их функционирования является гарантированное обеспечение качества обслуживания, что критически важно для современных услуг, включая видеоконференции, дополненную реальность, автономный транспорт и промышленный интернет вещей. В контексте 5G и 6G эти требования становятся еще более строгими, поскольку сети должны поддерживать крайне низкие задержки для приложений наподобие удаленной хирургии или автономных транспортных систем, а также массовую связь для миллионов устройств в умных городах [1]. Традиционные методы обеспечения качества обслуживания, такие как дифференцированная служба, интегрированная служба, многоуровневая коммутация по меткам, а также классические алгоритмы маршрутизации и распределения ресурсов

часто основываются на жестких правилах, статических моделях или требуют значительного ручного вмешательства. Они плохо справляются с нестационарностью, высокими темпами изменений и сложностью взаимозависимостей в современных самоорганизующихся сетях, где трафик может резко варьироваться из-за мобильности пользователей или иных событий.

Проблема заключается в разрыве между динамической, стохастической природой сетевой среды и статическим, детерминированным характером традиционных алгоритмов управления. В качестве решения предлагается использование машинного обучения, в частности глубокого обучения с подкреплением, которое позволяет агенту управления учиться оптимальной стратегии через прямое взаимодействие со средой методом проб и ошибок, максимизируя кумулятивную награду. Это обеспечивает создание систем, которые адаптивно учатся на опыте, находя нетривиальные решения для обеспечения качества обслуживания, включая балансировку нагрузки в реальном времени и предиктивную оптимизацию ресурсов.

Цель данной статьи – провести системный анализ применения методов глубокого обучения с подкреплением для задач автономного управления качеством обслуживания в самоорганизующихся сетях, описать ключевые архитектуры, выявить проблемы и наметить пути их решения, а также рассмотреть перспективы интеграции с новыми технологиями, такими как сетевые срезы и виртуализация в 6G. Задача управления сетью может быть описана как Марковский процесс принятия решений кортежем, включающим состояние сети, действие агента, вероятность перехода в новое состояние, функцию вознаграждения и коэффициент дисконтирования. Состояние сети может включать не только базовые метрики вроде матрицы задержек, уровня загрузки каналов, буферов узлов, уровня сигнала, требований трафика и энергетического статуса узлов, но и дополнительные параметры, такие как типы трафика от различных срезов сети или показатели интерференции в многопользовательских сценариях. Действие агента – это выбор следующего прыжка для пакета, выделение определенной полосы пропускания или ресурсов процессора, изменение мощности передачи, перенос вычислительной задачи, а в продвинутых случаях – динамическое перераспределение срезов или активация резервных узлов.

Вероятность перехода в новое состояние в сетях обычно неизвестна и стохастична, что идеально подходит для подходов глубокого обучения с подкреплением без модели, позволяющих агенту учиться на основе эмпи-

рических данных без необходимости в полной математической модели среды. Функция вознаграждения – ключевой элемент проектирования, она должна количественно отражать цель обеспечения качества обслуживания, например, как отрицательная сумма взвешенных задержки, потери пакетов и энергопотребления, или более сложные комбинации, учитывающие приоритеты разных типов трафика, такие как низкая задержка для критических приложений в 6G. Агент учится максимизировать сумму таких наград, балансируя краткосрочные и долгосрочные цели.

Коэффициент дисконтирования определяет важность будущих наград, что особенно актуально в динамических сетях, где будущие состояния могут значительно влиять на общую производительность. Глубокое обучение с подкреплением подходит для сетевых задач, поскольку позволяет работать в условиях неполной информации, когда агенту не нужна полная модель сети, что типично для распределенных систем с тысячами узлов. Оно обеспечивает адаптивность, когда стратегия постоянно обновляется в ответ на изменения, такие как миграция пользователей или сбои оборудования. Оно превосходит правила, находя сложные, неочевидные политики, превосходящие ручные настройки, например, в оптимизации энергоэффективности для батарейных устройств в IoT[2]. Некоторые методы позволяют предсказывать последствия действий, интегрируя модельные подходы для симуляции сценариев. Данная формула представляет проектирования целевой функции для агента DRL.

$$Rt = -(i \in F \sum wi \cdot Li(t) + \alpha \cdot P(t) + \beta \cdot E(t))$$

где *Rt* – награда (reward) в момент времени,

t – Цель агента-максимизировать ее сумму за длительную перспективу.

F – множество потоков трафика или сетевых срезов.

wi – весовой коэффициент, отражающий приоритет потока/среза *ii*

Li(t) – функция потерь для потока *ii.*

P(t) – штраф за потерю пакетов в сети в целом.

E(t) – энергопотребление сети или ее части.

α, β – коэффициенты балансировки, определяющие важность потерь и энергоэффективности относительно задержек.

Выбор архитектуры зависит от природы пространства действий и требований к стабильности обучения. Для дискретных действий, таких как выбор маршрута из конечного набора, подходят глубокая Q-сеть и ее произ-

водные, включая двойную Q-сеть для снижения переоценки и дублирующую Q-сеть для разделения оценки состояния и преимуществ действий [3]. Агент обучает Q-функцию, оценивающую ожидаемую полезность каждого действия в данном состоянии. Применяется для интеллектуальной маршрутизации, где действие – это выбор следующего узла, с учетом не только задержек, но и потенциальной интерференции или энергозатрат. Агент в каждом узле или централизованный контроллер наблюдает состояние соседних каналов и локальных буферов. Награда – отрицательная задержка доставки пакета, дополненная штрафами за потери или перегрузки. Со временем агент учится избегать перегруженных путей, минимизируя общую задержку, и даже предугадывать пиковые нагрузки на основе исторических данных. Для непрерывных действий, таких как выделение доли полосы пропускания или настройка мощности, подходит глубокий детерминированный градиент политики – гибридная архитектура с актор-критиком. Актор-сеть предлагает конкретное детерминированное действие, критик-сеть оценивает его качество, позволяя тонко настраивать параметры в многомерных пространствах. В сценарии сетевого срезания в сетях пятого поколения агент может динамически перераспределять радио ресурсы между срезами усиленного мобильного широкополосного доступа и сверх надежной связи с низкой задержкой в реальном времени, максимизируя общую полезность при гарантиях качества обслуживания для каждого среза, с учетом изменяющихся требований, таких как внезапный рост трафика от VR-приложений.

Близкий алгоритм оптимизации политики с проксимальным ограничением более стабилен и прост в настройке, ограничивая величину обновления политики и избегая деструктивных изменений. Он хорошо подходит для сложных, нестационарных сред, где среда меняется из-за действий других агентов или внешних факторов. В распределенных самоорганизующихся сетях централизованное управление часто невозможно или неэффективно. Здесь применяется мультиагентное глубокое обучение с подкреплением, где несколько агентов обучаются взаимодействовать, используя кооперативные или конкурентные схемы. Координация беспилотных летательных аппаратов, образующих временную сеть, служит примером: каждый аппарат как агент принимает решение о своей траектории и мощности передачи, наблюдая лишь локальное окружение.

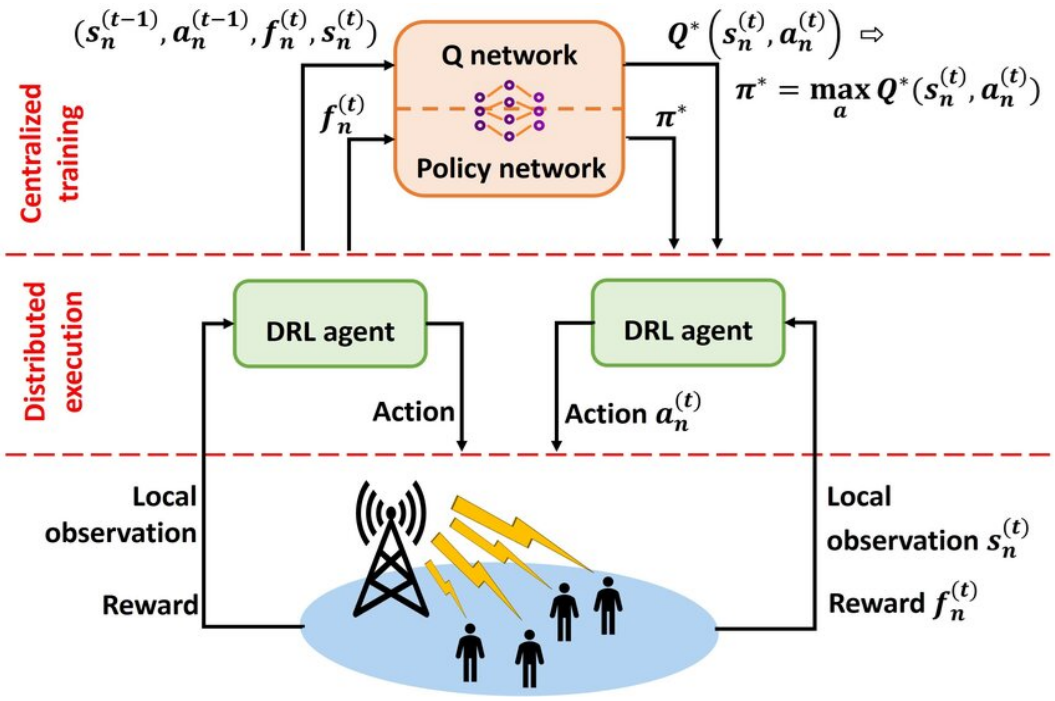


Рис. 1. Мультиагентная архитектура DRL

Общая цель – поддержание связности сети и минимизация интерференции, с наградами за коллективную производительность. Сложность заключается в обеспечении кооперации и избежаний нестабильности из-за нестационарности среды от действий других агентов, что решается через централизованное обучение с децентрализованным исполнением или механизмы обмена опытом. Прямое использование сырых данных о состоянии крупной сети приводит к комбинаторному взрыву, делая обучение неэффективным. Для решения применяются иерархические архитектуры: высокоуровневый агент управляет кластерами сети, низкоуровневые – внутри кластеров, разбивая задачу на подзадачи. Графовые нейронные сети в сочетании с глубоким обучением с подкреплением эффективны, поскольку сеть представляется графом. Такие сети обрабатывают структуру, извлекая признаки для агента, что улучшает обобщающую способность и масштабируемость, особенно в больших сетях 6G с миллионами подключений.

Системы глубокого обучения с подкреплением уязвимы к атакам на входы состояния или функцию вознаграждения, где злоумышленник может искажать данные для сбоев. Для решения проводится регулярный тренинг на данных, включающих аномалии, используется противоборствующее обучение для повышения устойчивости и внедряются механизмы доверия в мультиагентных подходах для изоляции скомпрометированных агентов, основанные на репутации или верификации. Прямое обучение

на работающей сети неприемлемо, поскольку случайные действия на начальном этапе могут нарушить ее работу, вызывая сбои в критических услугах. Решение – обучение на симуляторах и цифровых двойниках для первоначальной тренировки в реалистичной, но безопасной среде, моделирующей реальные сценарии 5G/6G. Затем применяется перенос обучения и его завершение онлайн: заранее обученную в симуляторе модель тонко настраивают на реальной сети с консервативной политикой, ограничивая иные действия для минимизации рисков.

Черный ящик глубокого обучения с подкреплением затрудняет принятие решений сетевыми инженерами и может вызвать проблемы с регулированием, особенно в отраслях с строгими стандартами. Для решения используются методы постфактум анализа для интерпретации решений агента и разрабатываются изначально интерпретируемые архитектуры, интегрирующие символическое рассуждение или визуализацию политик. Варианты реализации и развертывания включают централизованный подход, где агент работает на контроллере программно-определяемой сети или в облаке, подходящий для центров данных и ядра сети с высокой вычислительной мощностью. Распределенный подход подразумевает внедрение агентов в маршрутизаторы и базовые станции, требуя эффективных мультиагентных алгоритмов для координации на краю сети. Гибридный подход сочетает федеративное обучение с глубоким обучением с подкреплением: локальные агенты обучаются на своих данных, а затем агрегируют обновления моделей на центральном сервере, сохраняя конфиденциальность данных трафика и снижая нагрузку на сеть.

В контексте 6G дополнительные перспективы включают интеграцию с знаниями-ориентированными сетями, где глубокое обучение с подкреплением сочетается с семантическими базами для более осмысленного управления, или применение в V2X-сетях для энергоэффективной оптимизации, минимизируя активные базовые станции при сохранении низкой задержки для автономных транспортных средств. Исследования показывают, что такие подходы достигают до 97 % удовлетворения QoS в сценариях massive MIMO и снижают энергопотребление на 20-30 % по сравнению с традиционными методами [4]. Глубокое обучение с подкреплением представляет собой мощный и перспективный инструментарий для революции в управлении самоорганизующимися сетями. Способность агентов к автономному, адаптивному и оптимальному в долгосрочной перспективе принятию решений позволяет преодолеть фундаментальные ограничения традиционных

методов обеспечения качества обслуживания, включая переход к нулевому касанию в эксплуатации сетей. Несмотря на существующие вызовы – масштабируемость, безопасность, объяснимость и сложность обучения – активные исследования в области глубокого обучения с подкреплением, мультиагентных подходов, графовых нейронных сетей и цифровых двойников открывают путь к практическому внедрению. Будущие интеллектуальные сети, основанные на таком подходе, будут представлять собой живые, самооптимизирующиеся организмы, способные гарантировать исключительное качество обслуживания в самых динамичных и требовательных сценариях, от умных городов и промышленности 4.0 до космических коммуникаций, включая интеграцию с ИИ для предиктивного обслуживания и глобальной оптимизации.

Список используемых источников

1. Zmysłowski D., Kelner J. M. Correlational analysis in QoS parameter assessment for 5G emerging networks in Poland // 2023 Signal Processing Symposium (SPSympo). Karpacz, Poland, 2023. P. 226–229. DOI: 10.23919/SPSympo57300.2023.10302684.

2. Huang X., Cui Y., Chen Q., Zhang J. Joint task offloading and QoS-aware resource allocation in fog-enabled Internet-of-Things networks // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7, no. 8. P. 7194–7206.

3. Foukas X., Patounas G., Elmokashfi A., Marina M. K. Network slicing in 5G: Survey and challenges // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, no. 5. P. 94–100. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600951.

4. TS 123 107 – V18.0.0. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 18.0.0 Release 18) // 3GPP/ETSI. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_TS/123100_123199/123107/18.00.00_60/ts_123107 v180000p.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

APPLICATION OF DEEP REINFORCEMENT LEARNING FOR AUTONOMOUS QUALITY OF SERVICE MANAGEMENT IN SELF-ORGANIZING NETWORKS

Makolkina M., Mikhailov V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Self-organizing networks require new approaches to QoS provisioning. The paper explores the application of deep reinforcement learning DRL to create autonomous control systems. DRL agents are capable of learning optimal adaptive network parameter tuning. Such as: routing, real-time resource allocation, overcoming the limitations of traditional methods. DRL architectures, key challenges: scalability and implementation options are considered. It is concluded that DRL has a high potential for building intelligent and sustainable networks of the future.

Key words: self-organizing networks, deep reinforcement learning, service quality, Markov decision process, multi-agent learning

УДК 656.254
ГРНТИ 73.29.86

МОБИЛЬНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ РФ

А. А. Маслова, Ю. В. Юркин

Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I

Международный союз железнодорожников, который объединяет более 200 железнодорожных компаний из почти 100 стран мира, планирует в 2030 г. завершить эксплуатацию систем стандарта GSM-R и далее осуществлять многолетний, эволюционный переход к системам стандартов LTE-APro-R и 5G-R. Этот переход будет происходить на основе разработанной концепции будущей системы железнодорожной мобильной связи. Таким образом минимум десять лет на железных дорогах европейских стран, наравне с внедряемыми системами LTE-APro-R и 5G-R, будут использоваться системы стандарта GSM-R. Отмечается, что на железнодорожном транспорте Российской Федерации системы стандартов LTE-APro-R и 5G-R в первую очередь будут работать на направлениях высокоскоростного движения, обеспечивая функции поездной диспетчерской, станционной и маневровой, ремонтно-оперативной радио и общетехнологической связи, видеоконференцсвязи. В статье рассматриваются возможные этапы внедрения мобильных систем с пакетной коммутацией на железных дорогах, гипотетическая функциональная схема такой сети, перспективы организации гетерогенной сети мобильной связи железнодорожного транспорта Российской Федерации на базе стандартов трех поколений.

гетерогенная сеть мобильной связи, железнодорожный транспорт, система мобильной связи, LTE-APro-R, 5G-R

Международный союз железнодорожников UIC (Union International des Chemins de fer) и Европейское железнодорожное агентство ERA (European Union Agency for Railways) планируют замену системы мобильной связи стандарта GSM-R на будущую систему железнодорожных мобильных коммуникаций FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) к 2030 году. Следует сказать, что системы стандарта GSM-R, являются эталонными системами железнодорожной сигнализации и связи и функционируют на железных дорогах многих десятков стран всех континентов. Этот стандарт был опубликован в 1998 году и принят UTC как единый европейский стандарт только в 2008 году. В Европе более 100 тысяч км железных дорог оборудовано этими системами. В частности, системы стандарта GSM-R функционируют на Транс Европейской транспортной сети TEN-T (Trans-

European Transport Network). TEN-T включает в себя десять высокоскоростных железнодорожных магистралей: 4 коридора «Восток-Запад» (Северное море – Балтика, Средиземноморский, Рейн – Дунай, Страсбург-Дунайский); 4 коридора «Диагональные» (Балтийско-Адриатический, Северное море – Средиземное море, Восток/Восток – Средиземное море, Атлантический); 2 коридора «Север-Юг» (Скандинавско-Средиземноморский и Рейн – Альпийский). На российских железных дорогах процесс внедрения систем стандарта GSM-R начался значительно позже. ОАО «РЖД» разработало технические требования к системе стандарта GSM-R еще в 2011 году, однако, до недавнего времени, не так много железнодорожных направлений было оборудовано этими системами. Например, компания «ТрансТелеКом» развернула систему GSM-R на участках: Туапсе – Красная Поляна, Санкт-Петербург – госграница (станция Бусловская), Московское Центральное Кольцо и ряде других.

Первые пробные внедрения системы связи FRMCS начались в 2020 году. Сформированные функциональные рабочие группы UIC и партнерского проекта 3GPP, разработали требования к FRMCS в спецификациях UIC и 3GPP/ETSI. FRMCS представляет собой систему, обеспечивающую мобильную связь между пользователями как внутри каждой железной дороги, так и между разными железными дорогами и состоящую из сетевого оборудования FRMCS, сетей радиодоступа стандартов 4G и/или 5G, транспортных сетей связи и серверов железнодорожных приложений. Сети предыдущего поколения стандарта GSM-R не включаются в систему FRMCS.

В 2018 г. в рамках деятельности UIC и ERA были начаты работы над проектом, для чего были созданы под эгидой UIC нижеследующие интернациональные руководящие и рабочие группы [1-3] (рис.1).

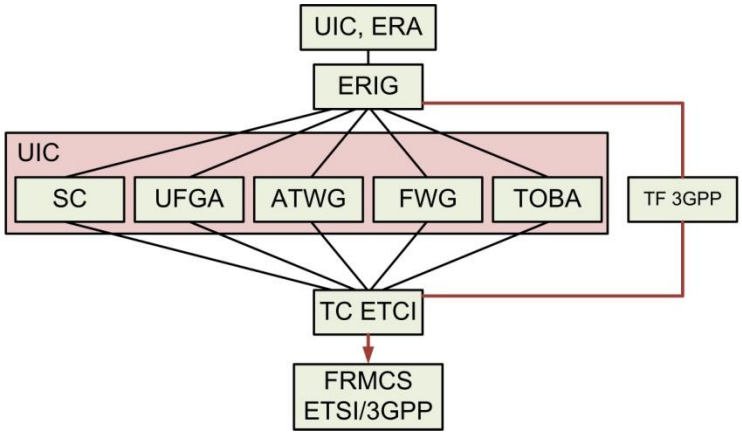


Рис. 1. Интернациональные руководящие и рабочие группы

Группа управления по стратегии и планированию FRMCS – SC (Strategy and Planning), координировала разработку и внедрение стандарта FRMCS на базе стандартов 4G/5G в процессе реализации долгосрочной стратегии перехода от стандарта GSM-R к FRMCS. Осуществляла управление функционированием остальных рабочих групп UIC по FRMCS: FWG, ATWG, UGFA, FWG, TOBA. Руководящая рабочая группа по функциональности сети – FWG (Functional Work Group), отвечала за формирование эксплуатационных требований к FRMCS и состава необходимых функций системы, обеспечивая переход от стандарта GSM-R к стандартам 4G/5G. Разрабатывала требования к функциональности бортовых систем локомотивов, включая приложения по управлению движением высокоскоростных поездов, по передаче речи, данных и видео. Рабочая группа по технологиям радиоинтерфейса FRMCS – ATWG (Application and Technology Working Group) разрабатывала спецификации для интерфейсов на базе стандартов 5G и LTE-AdvancedPro, обеспечивающих бесперебойную работу критически важных для железнодорожного транспорта приложений. Группа по частотным аспектам UGFA ((UIC Group for Frequency Affairs), координировала технические и регуляторные аспекты использования радиочастотного спектра, согласование частот на международном уровне, в первую очередь в Европе, разрабатывала сценарии совместной работы систем стандартов GSM-R и FRMCS на переходный период. Согласно решениям CEPT, для FRMCS в Европе выделены следующие основные диапазоны: 874.4–880.0 / 919.4–925.0 МГц (основной диапазон для обеспечения покрытия и реализации критически важных для безопасности железнодорожного движения функций); 1900–1910 МГц (дополнительный диапазон, обеспечивающий высокую пропускную способность системы при передаче видео и данных телеметрии). Группа TOBA (Telecom On-Board Architecture), – по разработке стандартов и архитектуры бортовых систем связи для поездов нового поколения. TOBA обеспечивала совместимость новых бортовых систем с требованиями 3GPP и другими международными стандартами, в том числе стандартами 4G/5G для железнодорожного транспорта. Целевая рабочая группа партнерского проекта 3GPP – TF (Task Force), осуществляла взаимодействие с рабочими группами UIC для включения специальных железнодорожных приложений в перечень приложений стандартов 4G/5G. Функционировала под руководством ERIG (European Railway Infrastructure Group) и тесно взаимодействовала с рабочей группой ATWG. В целом,

FRMCS представляет собой телекоммуникационную систему, включающую в себя мобильную сеть связи и набор приложений (рис.2)

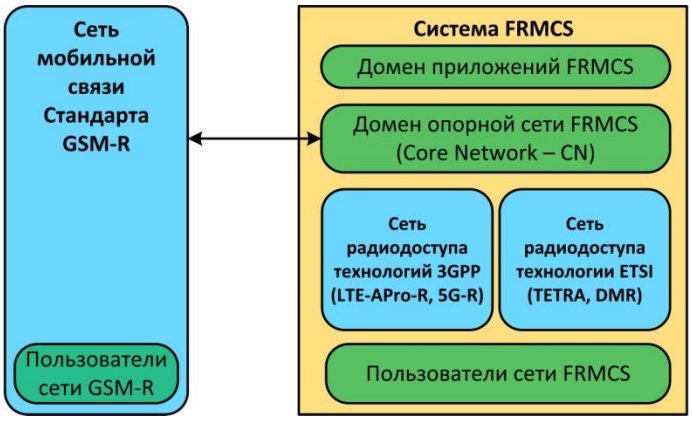


Рис. 2. Телекоммуникационная система FRMCS

На железнодорожном транспорте РФ на первом этапе внедрения FRMCS ведутся работы по организации сети мобильной связи стандарта LTE-APro-R (Railway). На рис.3 дано общее представление о взаимодействии «локомотив – Диспетчерский центр управления перевозками» в структуре ERTMS с применением мобильной сети данного стандарта.

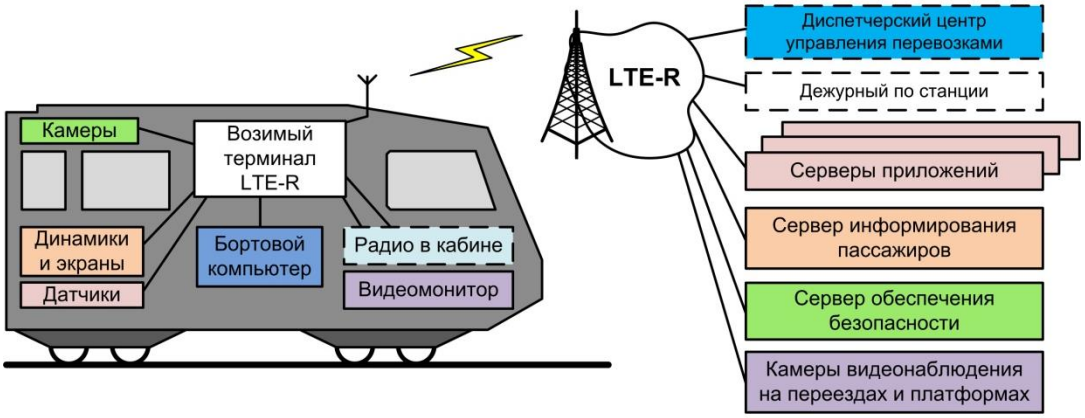


Рис. 3. Общее представление о взаимодействии «локомотив – Диспетчерский центр управления перевозками»

Архитектура сети стандарта LTE-A-Pro-R, помимо известных основных трех частей (подсистем): E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network), EPC (Evolved Packet Core) и IMS (IP-Multimedia Sub-system), включает в себя подсистему RS (Railway Specific).

Железнодорожная специфическая среда RS содержит два дополнительных компонента: пульт диспетчера и RSAP (Railway Service Application Part) – сервер, обеспечивающий прикладную часть специальных железнодорож-

ных услуг, в том числе относящихся к оперативно-технологической связи. В функции RSAP входит обеспечение процессов безопасного и бесперебойного движения поездов, осуществляемого при взаимодействии поездного диспетчера (ДНЦ) с оперативными работниками на станциях участка (дежурными по станциям) и машинистами поездов.

На первом этапе создания FRMCS на базе стандарта LTE-APro-R на железнодорожном транспорте РФ возможен сценарий внедрения, предполагающий наличие собственных сетевых компонентов мобильной железнодорожной инфраструктуры [4] – MRI (Mobile Railway Infrastructure), таких как: MME (Mobility Management Entity), HSS (Home Subscriber Server), PGW (Packet Date Network Getaway), SGW (Serving Getaway), PCRF (Policy and Charging Rules Function), IMS (IP Multimedia Sub-System), AS (Application Server). При этом сеть радиодоступа (сеть базовых станций) eNodeB (Evolved Node B) структуры железнодорожного транспорта на первом этапе создания собственной сети мобильной связи стандарта LTE-APro-R арендуют у базового оператора (MBNO – Mobile Base Network Operator) – рис. 5. Такой сценарий возможен для реализации видов диспетчерской связи, непосредственно не связанных с процессом безопасного и бесперебойного движения: линейно-путевой диспетчерская связи, вагонной, локомотивной, ремонтно-оперативной диспетчерские связи.

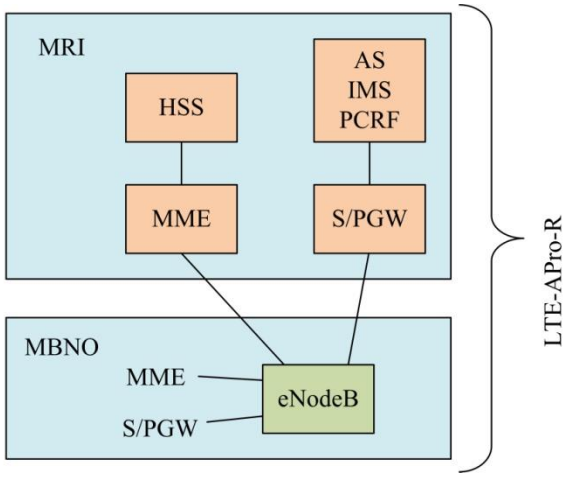


Рис. 4. Сценарий внедрения FRMCS на железнодорожном транспорте РФ

С учетом перспектив применения систем стандарта 5G-R на железнодорожном транспорте РФ, возможно построение гетерогенной сети мобильной связи [5], концепция построения которой представлена на рис. 6.

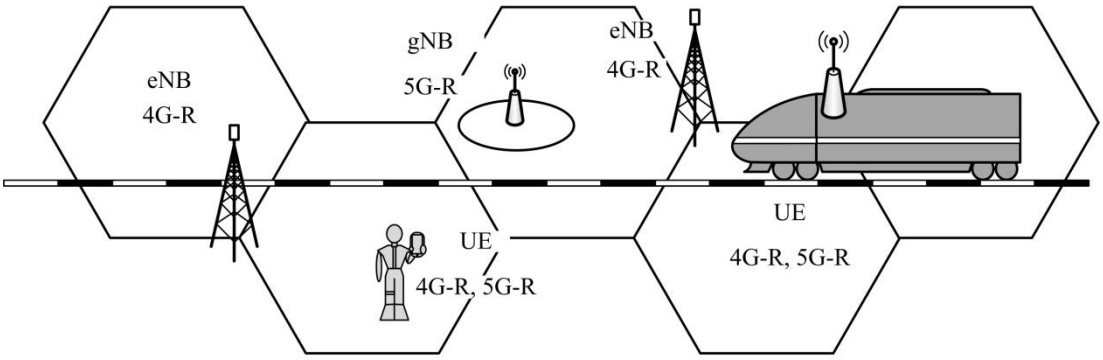


Рис. 5. Построение гетерогенной сети мобильной связи на железнодорожном транспорте

Сеть состоит из макросот, развернутых на железнодорожном участке с функционирующей системой мобильной связи стандарта LTE-APro-R, и микросот, расположенных в зданиях вокзалов на железнодорожных станциях, где реализована система стандарта 5G-R. Системы мобильной связи стандарта 5G-R могут быть развернуты на территории железнодорожных станций как для коммерческого обслуживания пользователей, так и для организации сетей интеллектуального видеонаблюдения. На железнодорожном транспорте реализация функций интеллектуального видеонаблюдения необходима для получения качественного изображения объекта в центре управления движением поездов; распознавания возможных нарушений на охраняемых объектах и железнодорожных переездах (как охраняемых, так и не охраняемых); контроля за доступом в служебные помещения на станциях; слежения за обстановкой в железнодорожных парках, на платформах, в залах ожидания вокзалов; для организации противопожарной безопасности и ГО. Возможность применения систем стандарта 5G-R потребует выделения для железнодорожного транспорта РФ новых частотных диапазонов, помимо уже имеющихся.

Список используемых источников

1. FU-7100-v.5.0.0. Future Railway Mobile Communication System User Requirements Specification. UIC FRMCS Functional Working Group, 19.02.2020.

2. MG-7900-v.2.1.0. (FRMCS Use Cases) Future Railway Mobile Communication System User Requirements Specification. UIC FRMCS Functional Working Group & Architecture and Technology Group, 19.02.2020.

3. TOBA-7540-v.1. Telecom On-Board System – Architecture Migration Scenarios. UIC FRMCS Telecom On-Board Architecture Working Group, 19.02.2020.

4. Юркин Ю. В., Иванов Д. А. Эволюция систем мобильной связи 4G: от стандарта LTE к LTE–Advanced Pro–R (Railway) // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 9. С 14-18.

5. Юркин Ю. В., Маслова А. А., Герасимов Е. М. Организация гетерогенной сети мобильной связи // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 10. С/ 15-19.

Статья представлена, доцентом кафедры электрической связи ПГУПС, кандидатом технических наук, доцентом Ю. В. Юркиным.

MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN RAILWAY TRANSPORT OF THE RUSSIAN FEDERATION

Maslova A., Yurkin Y.
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

The International Union of Railways, which unites more than 200 railway companies from nearly 100 countries around the world, plans to complete the operation of GSM-R systems by 2030 and thereafter carry out a long-term, evolutionary transition to LTE-APro-R and 5G-R standard systems. This transition will be based on the developed concept for the future railway mobile communication system. Thus, for at least ten years, GSM-R systems will continue to be used on the railways of European countries alongside the newly introduced LTE-APro-R and 5G-R systems. It is noted that in the railway transport of the Russian Federation, LTE-APro-R and 5G-R standard systems will primarily operate on high-speed traffic routes, providing functions for train dispatching, station and shunting, repair and operational radio communication, general technological communication, and video conferencing. The article discusses possible stages for the implementation of packet-switched mobile systems on railways, a hypothetical functional diagram of such a network, and the prospects for organizing a heterogeneous mobile communication network for the railway transport of the Russian Federation based on standards of three generations.

Key words: heterogeneous mobile communication network, railway transport, mobile communication system, LTE-APro-R, 5G-R

УДК 007:519.2
ГРНТИ 27.43.15

МОДЕЛИ БИНАРНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. РАЗВИТИЕ ПОНЯТИЙ

В. А. Медведев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Продолжается развитие темы бинарной последовательности, обсуждаемой в предыдущих работах [1-6]. Бинарная последовательность (БП) трактуется как дискретный случайный процесс, в котором дискрета может случайным образом принимать одно из двух возможных значений, обозначенных как 0 и 1. Произведено разделение бинарной последовательности на объект, который исследуется, и на модель, которая является результатом исследования. Определено влияние исследователя на модель. Показано значение тождества, определяющего связь характеристик БП при произвольных отсчетах одной позиции БП.

бинарная последовательность, модель, вероятность, среднее значение

Бинарная последовательность (БП) есть дискретный случайный процесс с двумя состояниями (обозначаемые как «0» и «1»). Она характеризуется своей константой [1]:

$$q/Q = const. \quad (1)$$

Здесь Q – количество позиций последовательности, а q – общее количество (допустим) единиц в последовательности.

Если производить произвольные отсчеты одной позиции БП, то в результате получаем реализацию бинарной последовательности (РБП), как например, на рис. 1. Обозначим через $P(0)$ вероятность получения нуля, а через $P(1)$ вероятность получения единицы при отсчете одной позиции последовательности и определим эти вероятности.

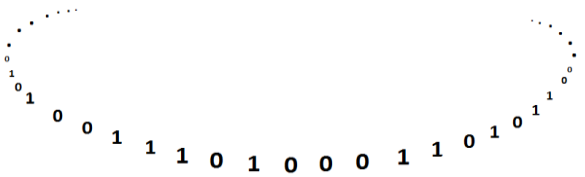


Рис. 1. Реализация бинарной последовательности

В РБП можно различить серии (пачки) нулей и единиц, следующих одна за другой [1]. Если обозначить через M_1 (M_0) среднее число единиц (нулей) в пачке, то можно дать определение вероятностей $P(0)$ и $P(1)$:

$$P(1) = \frac{M_1}{M_1+M_0};\ P(0) = \frac{M_0}{M_1+M_0}\ . \qquad (2)$$

Так как РБП получена путем независимых отсчетов бинарной последовательности (а другого способа не существует), то вероятность получения пары на соседних позициях равна произведению соответствующих вероятностей (2) при отсчетах одной позиции. Например, для $P(01)$:

$$P(01) = P(0)\ P(1). \qquad (3)$$

Для самой БП соотношения (2), естественно, выполняются, однако абсолютные значения величин M_0 и M_1 могут не совпадать со значениями соответствующих величин в РБП; совпадают только относительные величины $P(0)$ и $P(1)$. В результате в большинстве случаев структура (конфигурация) БП отличается от структуры РБП и следует использовать не соотношение (3), а более общее:

$$P(01) = P(0)\ P(0/1), \qquad (4)$$

где $P(0/1)$ – вероятность нахождения единицы на соседней позиции с обнаруженным нулем.

В [2] методом вероятностного позиционирования доказано, что в этом общем случае вероятность $P(0/1)$ определяется простой формулой:

$$P(0/1) = \frac{1}{M_0}, \qquad (5)$$

которая показывает, что вероятность зависит только от одного параметра – ширины пачки.

Бинарная последовательность есть неопределенность в отношении своей структуры. Для ее определения мы вначале производим отсчеты одной позиции БП. Эти отсчеты совершенно произвольны и другими быть не могут. В результате получается реализация БП как последовательность независимых отсчетов. У нее позиции никак не связаны и поэтому, например [4]: $P(0/1) = P(1)$ – вероятность нахождения «1» после «0» равна абсолютной вероятности получения «1». Или

$$\frac{1}{M_0} = \frac{M_1}{M_1+M_0}, \qquad (6)$$

откуда вытекает основное соотношение для независимых отсчетов [4]:

$$M_0 + M_1 = M_0 M_1. \quad (7)$$

Это соотношение является тождеством. Оно связывает вероятности и средние значения реализации бинарной последовательности при отсчетах одной позиции БП; при этом оно выступает и как ограничивающее условие на их значения.

Исследование БП отсчетами одиночных позиций привело к первичному рассмотрению парных отсчетов, что дало плодотворный результат в виде важного тождества (7). Кроме того, парные отсчеты показали [1], что бинарная последовательность не чувствительна к направлению, а, значит, представляет собой замкнутое кольцо. Соседние позиции в паре связаны соотношениями типа (5), что приводит к следующим формулам для безусловных вероятностей [1]:

$$P(0) = \frac{P(1/0)}{P(1/0)+P(0/1)}; \quad (8)$$

$$P(1) = \frac{P(0/1)}{P(1/0)+P(0/1)}. \quad (9)$$

И последнее. В ранних работах [1-6] были неопределенности с самой бинарной последовательностью, что затуманивало понимание (да и изложение) самого материала, хотя детально разработанные фрагменты и сводили концы с концами. Теперь бинарная последовательность трактуется как объект, который исследуется. Исследователь, воздействуя определенным образом на объект, формирует представление о нем в виде реализации бинарной последовательности. Но способ его действий (случайные, произвольные отсчеты) влияет на полученный результат (модель). Полученное тождество (7) характеризует системность этой модели и границы ее применимости.

Список используемых источников

1. Медведев В. А. Модели бинарной последовательности//IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. научных статей. Т. 1. СПб.: СПбГУТ, 2015. С. 538-542.

2. Медведев В. А. Вероятностные характеристики бинарной последовательности // V Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. научных статей. Т. 2. СПб.: СПбГУТ, 2016. С. 137-140.

3. Медведев В. А. Вероятностные характеристики бинарной последовательности. Продолжение // VI Международная научно-техническая и научно-методическая конфе-

ренция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. научных статей. Т.3 . СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 329-333.

4. Медведев В. А. Вероятностные характеристики бинарной последовательности. Окончание // VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. научных статей. Т. 2. СПб.: СПбГУТ, 2018. С. 491-494.

5. Медведев В. А. Вероятностные характеристики бинарной последовательности. Резюме // VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. научных статей. Т. 2. СПб.: СПбГУТ, 2019. С. 453-457.

6. Медведев В. А. Вероятностные характеристики бинарной последовательности. Резюме // IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. научных статей. Т. 2. СПб.: СПбГУТ, 2020. С. 314-317.

BINARY SEQUENCE MODELS. THE DEVELOPMENT OF CONCEPTS

Medvedev V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The topic of binary sequence, discussed in previous papers, continues to develop. A binary sequence (BS) is interpreted as a discrete random process in which a secret can randomly take one of two possible values, designated as 0 and 1. The binary sequence is divided into an object that is being investigated and a model that is the result of the study. The researcher's influence on the model is determined. The value of the identity determining the relationship of the BS characteristics for arbitrary readings of one BS position is shown.

Key words: binary sequence, model, probability, average value

УДК 621.396.621
ГРНТИ 47.49.31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GNSS RTK В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННЫХ ПОМЕХ

Д. Е. Мещеряков, Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Совершенствование технологий позиционирования в сетях пятого и последующих поколений позволяет говорить о достижении метровой и дециметровой точности в некоторых сценариях. Однако в ряде приложений требуется сантиметровая точность, доступная на сегодняшний день исключительно глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС, GNSS – Global Navigation Satellite System) геодезического класса, основанными на дифференциальных поправках, получаемых от наземных служб референсных базовых станций. В реальном времени достижение сантиметровой точности достигается так называемыми системами GNSS RTK (Real Time Kinematic «кинематика реального времени»). Снижение точности их работы наблюдается при искусственных помехах приема сигналов ГНСС и сигналов поправок. В настоящей работе представлены результаты экспериментальной оценки точности позиционирования системами GNSS RTK в условиях искусственных помех. На примере комплекта Prince показано, что экранирование ровера металлоконструкцией снижает точность оценок координат с единиц миллиметров до единиц дециметров.

GNSS RTK, позиционирование, помехи, металлоконструкции, эксперимент

Высокоточное позиционирование востребовано в различных сценариях работы сетевых устройств [1]. В сетях 5G достигается метровая точность оценок координат [2]. Однако для ряда сценариев, включая позиционирование транспортных средств (ТС), требуется дециметровая точность [3]. Такая точность достигается в беспроводных локальных сетях IEEE 802.11az [4], но такие сети не отвечают требованиям географической протяженности функционирования ТС. Дециметровая точность может быть достигнута глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС, GNSS – Global Navigation Satellite System), основанными на дифференциальных поправках, получаемых от референсных базовых станций [5]. В реальном времени достижение дециметровой точности достигается системами геодезического класса GNSS в режиме RTK (Real Time Kinematic «кинематика реального времени») [6]. Эксперименты с оборудованием PrinCe [7]

показали достижение сантиметровой точности при конфигурации получения ровером поправок от базы в режиме RTK [8].

Снижение точности RTK систем [9–24], помимо прочего, обусловлено искусственными помехами. В настоящей работе представлены результаты экспериментальной оценки точности позиционирования системами GNSS RTK в условиях экранирование ровера PRINCE металлоконструкцией.

Метод RTK основан на использовании опорного навигационного приемника (базы), установленного в точке с точно известными координатами. Этот приемник, получая спутниковые данные, вычисляет отклонения от своих истинных координат и формирует поправки. Данные поправки в реальном времени передаются на мобильный приемник (ровер), который использует их для уточнения собственного местоположения. Это позволяет достигать точности определения координат на уровне нескольких сантиметров. В рамках исследования был развернут измерительный стенд для записи навигационных данных в режиме RTK. В качестве базовой станции использовался многоканальный приемник Prince I30 [25]. Для точного определения исходных координат этой базы была задействована внешняя сеть опорных станций «Геоспайдер» [26]. Приемник изначально был настроен в режиме ровера и получал дифференциальные поправки через NTRIP-соединение (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) [27]. Данный протокол позволяет передавать корректирующие данные (в форматах RTCM, CMR и др.) от сети базовых станций через интернет в реальном времени. Поправки принимались клиентским приложением на приемнике и использовались для высокоточного определения его местоположения. После точного определения координат приемника Prince I30 он переводился в режим стационарной базовой станции с фиксацией полученной опорной точки. В роли мобильного ровера использовался приемник PrinCe I90VR [28], который получал поправки от базы Prince I30 по радиоканалу в УКВ-диапазоне. Для фиксации вычисленных координат и сбора статистики в реальном времени к роверу был подключен компьютер со специализированным программным обеспечением для мониторинга.

На рис. 1 показана конфигурация базы и ровера в режиме GNSS RTK, а на рис. 2 – среднеквадратическое отклонение (СКО) координат по широте и долготе в метрах относительно времени; за истинное местоположение взято нулевое значение широты и долготы.



Рис. 1. Конфигурация базы и ровера в режиме GNSS RTK

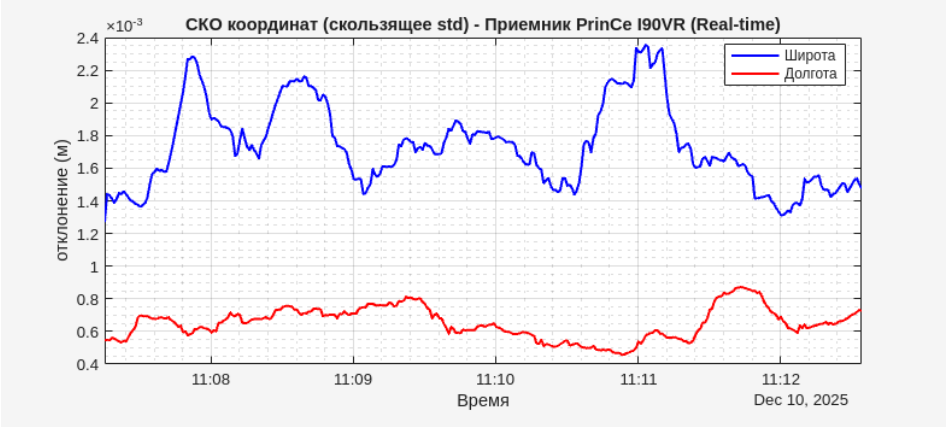


Рис. 2. СКО координат приемника PrinCe в сценарии LOS

На рис. 3. показан сценарий искусственных помех, которые получается в условиях отсутствия прямой видимости NLOS (Non Line of Sight) в результате экранирования ровера металлической решеткой, а на рис. 4 – СКО широты и долготы в метрах относительно времени.



Рис. 3. Экранирование ровера GNSS RTK металлической решеткой

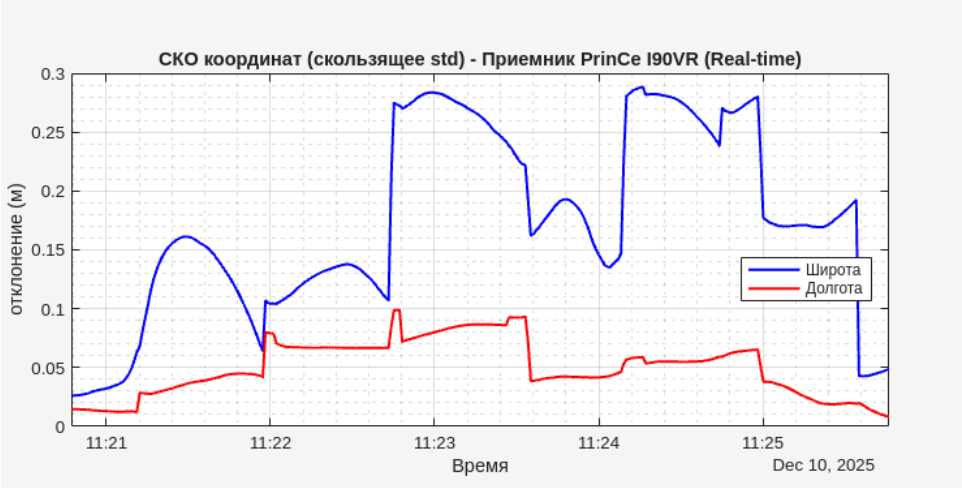


Рис. 4. СКО координат приемника PrinCe в сценарии NLOS

Сравнение графиков на рис. 2 и 4 позволяет сделать вывод о том, что экранирование ровера металлоконструкцией снижает точность оценок координат с единиц миллиметров до единиц дециметров.

Список используемых источников

1. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8, № 2. С. 48–63.

2. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8, № 3. С. 80–99.

3. Фокин Г. А., Владыко А. Г. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 4. С. 45–59.

4. Фокин Г. А., Багаев Е. С., Мещеряков Д. Е. Позиционирование в беспроводных локальных сетях Wi-Fi стандарта IEEE 802.11az. Часть 1. Постановка задачи достижения дециметровой точности // Первая миля. 2025. № 1 (125). С. 50–56.

5. Grewal M. S., Andrews A. P., Bartone C. G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. 4th ed. Wiley, 2020. 608 p.

6. Петров И. А. Высокоточное определение относительных координат по сигналам ГНСС методом RTK: магистерская диссертация. СПб., 2021. 53 с.

7. АО «ПРИН». URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/ (дата обращения: 31.01.2026).

8. Фокин Г. А., Мещеряков Д. Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса PRINCE для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество систем связи. 2025. № 3 (37). С. 77–95.

9. Bian Y., Cao S., Wang G. [et al.]. A Stable RTK/MEMS-IMU Tightly-Coupled Algorithm Under Differential Corrections Outage // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2025. Vol. 74, Iss. 8. P. 12895–12906.

10. Lu W., Luo Y., Guo C. [et al.]. An Iterated Equivariant Filter and Its Application in Tightly Coupled SINS/GNSS Integrated Navigation // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2025. Vol. 74. Art. no. 9518314.

11. Yang Y.-S., Jan S.-S. Enhanced Single Station PPP-RTK using CNES SSR Correction // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025. P. 481–485.

12. Hu J., Li P., Feng J. [et al.]. Enhancing Smartphone Relative Positioning With Partial Wide-Lane Ambiguity Resolution // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12, Iss. 3. P. 3177–3187.

13. Ruwisch F., Schön S. Feature Map Aided Robust High Precision GNSS Positioning in Harsh Urban Environments // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2025. Vol. 26, Iss. 9. P. 13721–13733.

14. Zhang J., Feng W., Wang H. Research on the Impact of Array Anti-interference Antennas on RTK Positioning and Compensation Methods // 2024 IEEE 7th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). 2024. P. 843–848.

15. Chen C., Ge Y., Zhao X. [et al.]. Improving Single-Frequency Multi-GNSS RTK/INS Tightly Coupled Integration by Mixing Time-Differenced and Double-Differenced Carrier Phase for Vehicle-Borne Positioning // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12, Iss. 6. P. 6696–6707.

16. Wang R., Blanch J., Walter T. Overbounding Time-correlated Errors for a Multi-constellation Precise Point Positioning Integrity Service // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025. P. 235–243.

17. Huang J. [et al.]. Pedestrian Navigation Using Waist-Mounted IMU and RTK // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25, Iss. 3. P. 5510–5519.

18. Liu X., Ballal T., Al-Naffouri T. Y. Performance Analysis of Antenna Array-Aided RTK Positioning // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2025. Vol. 61, Iss. 2. P. 5325–5336.

19. Chun J. [et al.]. Performance Evaluation of the Latest Smartphones and Smartwatch Using GNSS Raw Measurements // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025. P. 1527–1535.

20. Grosch A., Crespillo O. G. Robust Railway Ground Truth and Confidence Bounds Estimation based on RTK/INS Forward-Backward Smoothing // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025. P. 1336–1347.

21. Dampf J., Bochkathi M., Pany T. RTK performance of synthetic aperture processing on top of the ULB-PLL method with real-world urban GPS/Galileo L1/L5 signals // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025. P. 1226–1238.

22. Wang R. [et al.]. RTK-LIO: Tightly Coupled RTK/LiDAR/Inertial Navigation System Based on Optimization Approach // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25, Iss. 13. P. 26220–26227.

23. Spanghero M., Papadimitratos P. UnReference: analysis of the effect of spoofing on RTK reference stations for connected rovers // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025. P. 316–327.

24. Cai Y., Cheng P., Meng X. [et al.]. Using network RTK corrections and low-cost GPS receiver for precise mass market positioning and navigation applications // 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2011. P. 345–349.

25. Приемник PrinCe i30 // Принмаркет. URL: https://prinmarket.ru/catalog/ priyemniki/ prince_2/i30/priemnik_prince_i30/ (дата обращения: 31.01.2026).

26. Геоспайдер. ООО «НПП «ГЕОМАТИК». URL: https://geospider.ru/ (дата обращения: 31.01.2026).

27. Ntrip – Networked Transport of RTCM via Internet Protocol. URL: https://igs.bkg.bund.de/ntrip/ (дата обращения: 31.01.2026).

28. Приемник PrinCe i90VR // АО «ПРИН». URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i90_vr/ (дата обращения: 31.01.2026).

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ACCURACY OF GNSS RTK SATELLITE POSITIONING UNDER ARTIFICIAL INTERFERENCE CONDITIONS

Meshcheryakov D., Fokin G.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Advances in fifth-generation and later positioning technologies make it possible to achieve meter- and decimeter-level accuracy in some scenarios. However, some applications require centimeter-level accuracy, which is currently only available with geodetic-class global navigation satellite systems (GNSS) based on differential corrections received from ground-based reference base stations. In real time, centimeter-level accuracy is achieved by so-called Real-Time Kinematic (RTK) GNSS systems. A decrease in their accuracy is observed with artificial interference in the reception of GNSS signals and correction signals. This paper presents the results of an experimental assessment of the positioning accuracy of GNSS RTK systems under artificial interference. Using the PRINCE system as an example, it is demonstrated that shielding the rover with a metal structure reduces the accuracy of coordinate estimates from centimeters to meters.

Key words: GNSS RTK, positioning, interference, metal structures, experiment

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР СХЕМ МОДУЛЯЦИИ И КОДИРОВАНИЯ (MCS) ПРИ СВЕРХНАДЕЖНОЙ СВЯЗИ С МАЛОЙ ЗАДЕРЖКОЙ (URLLC)

С. Н. Нгуен, А. И. Парамонов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В системах связи, ориентированных на предоставление услуг со сверхвысокой надежностью и предельно малой задержкой, использование классических алгоритмов адаптации, направленных исключительно на максимизацию скорости передачи, становится неприемлемым. Основная причина заключается в том, что такие подходы не способны обеспечить выполнение строгих требований к времени доставки пакета и вероятности его потери. В работе детально исследуется фундаментальное противоречие: повышение эффективности передачи за счет более высоких порядков модуляции увеличивает пиковую скорость, однако делает систему уязвимее к помехам. Это требует более высокого отношения сигнал-шум и, в условиях его недостаточности, ведет к росту числа ошибок. Возникающие повторные передачи, хотя и призваны исправить ошибки, неизбежно увеличивают итоговую задержку доставки. Для решения этой проблемы разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между выбираемым режимом передачи и требуемыми показателями качества. На ее основе предложен новый алгоритм, главной целью которого является минимизация времени доставки при безусловном соблюдении заданного порога надежности.

URLLC, MCS, адаптивная модуляция и кодирование, сверхнадежная связь с малой задержкой, надежность, задержка, HARQ, 5G, 6G, управление радиоресурсами

Развитие сетей пятого и шестого поколений привело к появлению класса услуг сверхнадежной связи с малыми задержками, известного как URLLC. Данный сервис требует одновременного обеспечения двух противоречивых условий: вероятности ошибки на уровне 10^{-5} и сквозной задержки не более 1-10 миллисекунд для коротких пакетов [1, 2]. В таких условиях классические алгоритмы адаптивной модуляции и кодирования (АМК), успешно применяемые для сервисов с высокой пропускной способностью [3], оказываются неэффективными. Выбор слишком высокой позиции модуляционно-кодовой схемы (MCS) повышает пиковую скорость, но снижает помехоустойчивость, что приводит к росту числа повторных передач и непредсказуемому увеличению задержки. С другой стороны, излишне

консервативный выбор MCS гарантирует надежность, но ведет к нерациональному использованию частотного ресурса. Предложен новый алгоритм выбора MCS, ориентированный на приоритетное обеспечение надежности. Алгоритм гарантирует выполнение требований по задержке и повышает эффективность использования частотного ресурса за счет динамической адаптации к состоянию канала.

Традиционные алгоритмы АМК, используемые в сетях 4G/5G, в первую очередь нацелены на максимизацию пропускной способности. Для каждого полученного значения отношения сигнал-шум (SINR) алгоритм выбирает наиболее высокий индекс MCS при котором оцененная вероятность ошибки на блок (BLER) не превышает заданный целевой порог:

$$m^* = max\{ m \in M | BLER_{est}(m, SINR) \leq BLER_t \}, \quad (1)$$

где целевая вероятность ошибки на транспортный блок $BLER_t$ обычно устанавливается на уровне 0,1 (10 %) [4]. Это означает, что в среднем каждый десятый пакет требует повторной передачи по протоколу (HARQ). Для URLLC это неприемлемо, так как даже одна повторная передача может превысить жесткий лимит задержки.

Для повышения точности работы в условиях быстрых изменений канала используется алгоритм с внешним контуром адаптации (OLLA) [5, 6]. Он вводит корректирующее смещение Δ_{OLLA}, которое изменяется в зависимости от приходящих квитанций:

$$\Delta_{OLLA}(t) = \begin{cases} \Delta_{OLLA}(t-1) + \Delta_{up}, \text{при} NACK \\ \Delta_{OLLA}(t-1) - \Delta_{down}, \text{при} ACK \end{cases} \quad (2)$$

При получении отрицательного подтверждения (NACK) смещение увеличивается, чтобы сделать выбор MCS более консервативным. При получении подтверждения (ACK) смещение уменьшается, постепенно повышая агрессивность выбора модуляции.

Основным недостатком классического алгоритма OLLA применительно к сервисам сверхнадежной связи с малой задержкой является его медленная сходимость. Для достижения целевого уровня надежности алгоритму требуется значительное количество передач, что делает его практическое использование в условиях жестких ограничений по времени невозможным.

Для решения выявленных проблем предлагается алгоритм, ключевой особенностью которого является разделение процесса адаптации на два этапа. На этапе начальной передачи применяется консервативный подход с дополнительным запасом, что обеспечивает BLER < 10^{-5} уже с первого

пакета. Благодаря этому пакет данных успешно передается с первой попытки, что полностью исключает необходимость в повторных передачах и гарантирует выполнение жестких требований к сквозной задержке. В последующих передачах активируется алгоритм адаптации на основе обратной связи по вероятности ошибки блока (Block Error Probability, BLEP).

После успешного декодирования транспортного блока пользовательское оборудование (UE) вычисляет значение взаимной информации на бит для каждого принятого ресурсного элемента. Данный расчет основывается на оценках отношения сигнал-шум на входе декодера:

$$MI_i = \phi(SINR_i) \tag{3}$$

где $\phi(.)$− функция, определяемая посредством таблицы поиска (LUT) на основе предварительных модельных исследований.

Путем усреднения полученных значений по всем ресурсным элементам определяется средняя взаимная информация для всего транспортного блока:

$$MMI = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} MI_i \tag{4}$$

На основе полученной средней взаимной информации, а также с учетом размера транспортного блока и скорости кодирования, пользовательское оборудование формирует оценку вероятности ошибки в блоке для переданных данных:

$$\underline{BLEP_{est} = \Psi(MMI, TBS, R)} \tag{5}$$

где TBS − размер транспортного блока, R − скорость кодирования, $\Psi(.)$− трехмерная LUT, учитывающая размер транспортного блока (TBS) и скорость кодирования R.

Для коррекции работы алгоритма используется механизм, аналогичный внешнему контуру регулировки, который учитывает не только факт успешной или неуспешной передачи, но и степень близости к целевому показателю надежности:

$$\Delta_{OLLA}(t) = \begin{cases} \Delta_{OLLA}(t-1) + \Delta_{up}, \text{при} BLEP > \phi \\ \Delta_{OLLA}(t-1) - \Delta_{down}, \text{при} BLEP \leq \phi \end{cases} \tag{6}$$

Эффективное значение SINR для выбора MCS определяется как:

$$SINR_{eff} = SINR_t - \Delta_{OLLA} \tag{7}$$

Новый индекс MCS выбирается из условия:

$$MCS = agr\,min\{\,|BLER(m, SINR_{eff}) - \phi|\} \quad (8)$$

Для верификации предложенного подхода было проведено имитационное моделирование в сценарии с постоянным отношением сигнал-шум (SINR) 15 дБ и смещением в отчетах 1 дБ для имитации неидеальности измерений. Количество переданных пакетов составило 25000, заданный целевой порог BLER = BLEP = 10^{-5}.

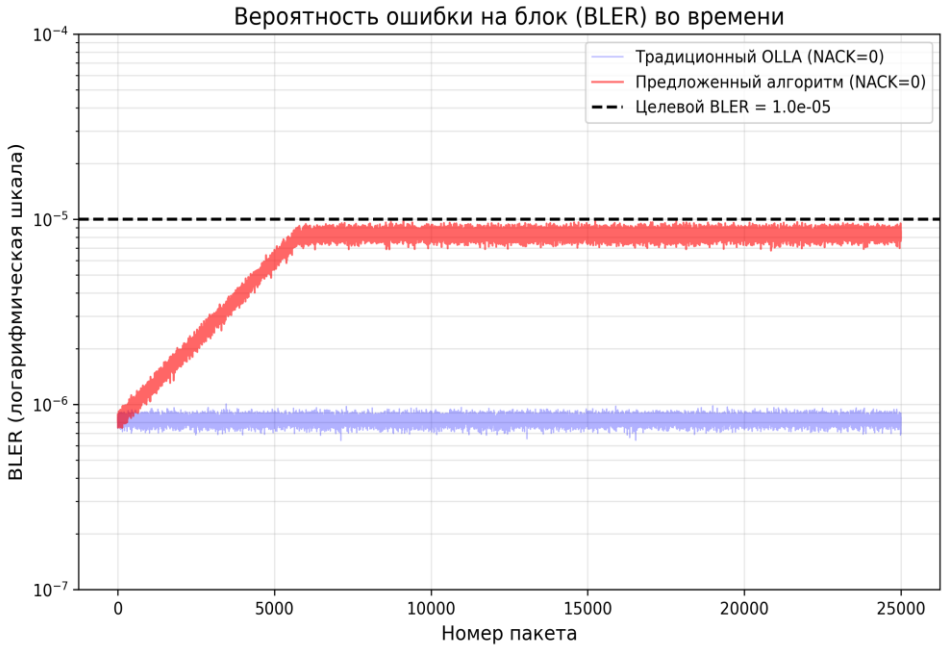


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки на блок (BLER) от времени

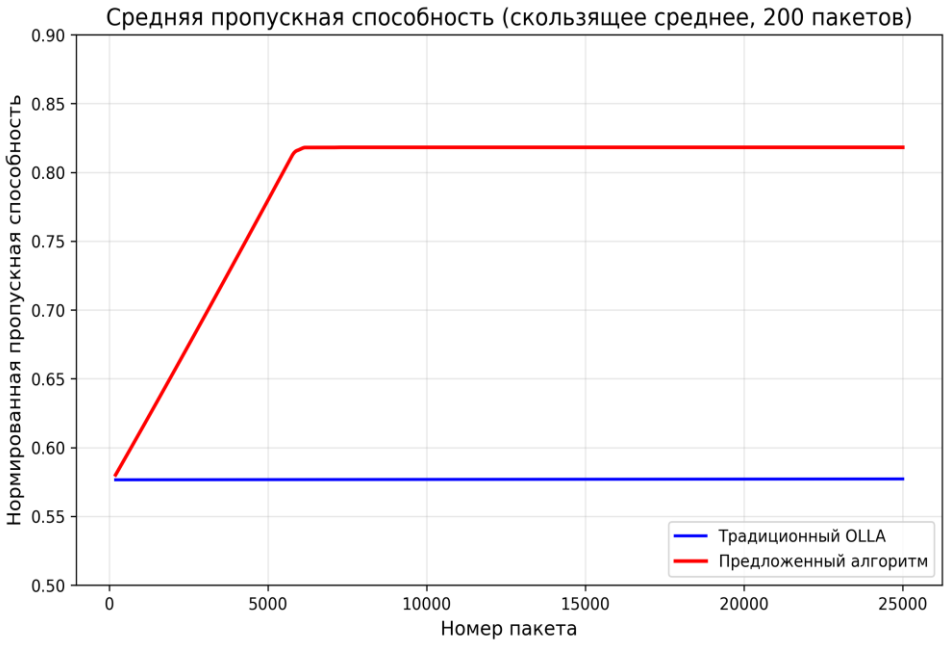


Рис. 2. Зависимость средней пропускной способности от от времени

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что классический алгоритм OLLA с бинарной обратной связью не удовлетворяет требованиям сверхнадежной связи с малой задержкой: уровень блочных ошибок составляет 6×10^{-7}, значительно ниже целевого значения 10^{-5}, что приводит к неэффективному использованию частотного ресурса. При этом NACK практически отсутствуют, и алгоритм не получает обратной связи для адаптации.

Разработанная двухэтапная стратегия обеспечивает гарантированную надежность с первой передачи за счет консервативного запаса в 5 дБ, полностью исключая повторные передачи и связанные с ними задержки, а последующая адаптация по вероятности ошибки в блоке плавно выводит систему на целевой уровень при максимальной спектральной эффективности.

Предложенный алгоритм демонстрирует увеличение нормированной пропускной способности с 0,58 до 0,82 (прирост 24 %) при полном отсутствии повторных передач на 25000 пакетах, что полностью соответствует требованиям к услугам с ультрамалыми задержками.

Список используемых источников

1. 3GPP TS 38.300. NR; Overall description; Stage-2 (Release 16). 3GPP, 2020.

2. Paramonov A., Kashkarov D., Muthanna A., Koucheryavy A., Peng J., Elgendy I.A., Maleh Y., Abd El-Latif A.A. Study and Analysis of Multiconnectivity for Ultrareliable and Low-Latency Features in Networks and V2X Communications // Wireless Communications and Mobile Computing, 2021, T. 2021, P. 1718099.

3. M. Taki and F. Lahouti. Spectral Efficiency Optimized Adaptive Transmission for Interfering Cognitive Radios // 2009 IEEE International Conference on Communications Workshops, Dresden, Germany, 2009, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICCW.2009.5208057.

4. J. S. Harsini and F. Lahouti. Optimized Link Adaptation for Wireless Packet Communications Based on Discrete-Rate Modulation and Coding Schemes // IEEE Workshop Signal Processing Advances in Wireless Communications, Helsinki, June 2007. pp. 17-20.

5. Blanquez-Casado, F., Gomez, G., Aguayo-Torres, M.d. et al. eOLLA: an enhanced outer loop link adaptation for cellular networks // J Wireless Com Network 2016, 20 (2016).

6. M. Liu, J. Chen, G. Wu, L. Ji and H. Wang. Soft-Ack based Outer Loop Link Adaptation for Latency-constrained 5G Video Conferencing // GLOBECOM 2023 – 2023 IEEE Global Communications Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 388-393, DOI: 10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437503.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры СС и ПД СПбГУТ, доктором технических наук, профессором А. И. Парамоновым.

OPTIMAL SELECTION OF MODULATION AND CODING SCHEMES (MCS) FOR ULTRA-RELIABLE LOW-LATENCY COMMUNICATIONS (URLLC)

Nguyen N., Paramonov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In communication systems designed to provide services with ultra-high reliability and extremely low latency, the use of classical adaptation algorithms aimed solely at maximizing data transmission rate becomes unacceptable. The primary reason is that such approaches cannot meet the strict requirements for packet delivery time and loss probability. This work investigates in detail a fundamental contradiction: increasing transmission efficiency through higher modulation orders enhances the peak data rate but makes the system more vulnerable to interference. This demands a higher signal-to-noise ratio and, under insufficient conditions, leads to an increase in the number of errors. The resulting retransmissions, although intended to correct errors, inevitably increase the overall delivery delay. To address this issue, a mathematical model is developed that establishes the relationship between the selected transmission mode and the required quality of service metrics. Based on this model, a novel algorithm is proposed, whose primary goal is to minimize delivery time while strictly adhering to a specified reliability threshold.

Key words: URLLC, MCS, adaptive modulation and coding, ultra-reliable low-latency communication, reliability, latency, HARQ, 5G, 6G, radio resource management

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

МЕТОДЫ СЛИЯНИЯ ДАННЫХ С СЕНСОРОВ ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

А. А. Павловская, М. В. Павловский, С. Л. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются методы слияния данных с сенсоров видимого и инфракрасного диапазонов с камер на БПЛА. Анализируются три ключевые стратегии: пиксельное слияние, слияние на уровне признаков и уровне решений, а также обязательный этап геометрической регистрации. Определены области эффективного применения и сформулированы основные технологические вызовы.

беспилотный летательный аппарат, тепловизионное видео, слияние данных, RGB, геометрическая регистрация, видеоаналитика, обнаружение аномалий, компьютерное зрение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали неотъемлемым инструментом для мониторинга обширных территорий и труднодоступных объектов. Основу их функционала составляет видеоаналитика, эффективность которой напрямую зависит от качества и типа исходных данных [1]. Оптические камеры видимого диапазона (RGB) обеспечивают интуитивно понятное, детализированное изображение, идеальное для алгоритмов распознавания образов, обученных на обширных наборах данных. Однако их принципиальный недостаток – полная зависимость от условий освещения, что делает их бесполезными в темноте, тумане или при сильной задымленности [2].

Тепловизионные камеры, регистрирующие собственное инфракрасное излучение объектов в длинноволновом диапазоне, лишены этого недостатка. Они обеспечивают всепогодность и круглосуточность наблюдения, выявляя объекты по контрасту их температуры с фоном [3]. Это делает их незаменимыми для поиска людей, обнаружения перегревов в электрооборудовании и очагов возгорания. Однако тепловизионные данные характеризуются низким пространственным разрешением, отсутствием привыч-

ных визуальных деталей и сложностью интерпретации, так как яркость пикселя определяется комплексом факторов: фактической температурой поверхности, коэффициентом эмиссии материала и условиями окружающей среды.

Таким образом, RGB- и тепловизионная камеры обладают комплементарными характеристиками. Задача их интеграции в единую аналитическую систему является актуальной. Настоящая статья посвящена систематизации методов слияния данных от этих двух типов сенсоров на борту БПЛА, целью которого является создание информационного представления, превосходящего по своей полезности данные каждого сенсора в отдельности.

Тепловизионное изображение формируется на принципиально иной физической основе, нежели RGB. Если оптическая камера фиксирует отраженный свет, то тепловизор измеряет интенсивность собственного излучения объекта, описываемого законом Стефана–Больцмана. Это обуславливает его ключевые особенности: независимость от освещения, но сильную зависимость показаний от излучательной способности материалов. Например, металлические поверхности с низкой эмиссией могут отражать излучение других тел, искажая реальную температурную картину.

Низкое пространственное разрешение матриц тепловизоров (часто 640×512 или 320×240 пикселей) накладывает ограничения на применение классических методов компьютерного зрения, ориентированных на текстуру. Поэтому базовые методы анализа делают акцент на температурных и морфологических признаках. Для детектирования тепловых аномалий, таких как перегрев или пожары, широко применяются пороговые методы, дополненные анализом динамики роста температурного кластера в последовательных кадрах [4]. Поиск людей и животных в сложных условиях также часто начинается с сегментации по порогу температуры, характерному для живого организма (≈30–37 °C), с последующей фильтрацией по форме, площади и компактности выделенных областей. Наиболее эффективными, особенно при частичных окклюзиях, являются методы глубокого обучения, где нейронная сеть обучается выделять характерные тепловые сигнатуры.

Процесс слияния является многоэтапным. Его основой служит геометрическая регистрация. Из-за разного физического расположения, фокусного расстояния и поля зрения камер один и тот же объект проецируется в разные координаты на их матрицах. Корректное совмещение достигается либо аппаратной калибровкой с известными параметрами установки, либо программными методами сопоставления общих контуров и характерных точек

на обоих типах изображений. Без точной регистрации любое последующее слияние теряет смысл [5].

После регистрации применяются стратегии слияния различного уровня интеграции (рис. 1).

1. Слияние на пиксельном уровне (Pixel-level Fusion). Наиболее наглядный метод, при котором информация напрямую комбинируется в пикселях результирующего изображения. Типичный пример – наложение тепловой карты на RGB-изображение путем присвоения температурных значений одному из цветовых каналов (например, красному). Теплые объекты окрашиваются в красные и желтые тона, холодные – в синие, сохраняя при этом визуальный контекст RGB-сцены. Метод прост в реализации и идеален для визуального анализа оператором, но приводит к потере части исходной цветовой информации.

2. Слияние на уровне признаков (Feature-level Fusion). Данные с каждого сенсора обрабатываются параллельно для извлечения признаков высокого уровня (контуры, дескрипторы, карты объектов), которые затем объединяются. В архитектурах глубокого обучения это реализуется как сеть с двумя параллельными ветвями-энкодерами для RGB и теплового потока. Признаки с обеих ветвей конкатенируются на последующих слоях, и общая классификационная голова принимает решение на основе комбинированного набора признаков. Это позволяет, например, с высокой точностью отличать человека (тепловая сигнатура + визуальная форма) от оленя или нагретого камня.

3. Слияние на уровне решений (Decision-level Fusion). Наиболее гибкий подход, при котором каждый сенсорный поток обрабатывается полностью независимой цепочкой алгоритмов вплоть до формирования своего списка обнаружений и классификаций. Затем модуль-арбитр по заданным правилам разрешает конфликты и выносит итоговое решение. Например: «Если тепловой детектор обнаружил аномалию с температурой >150 °C, а RGB-детектор не нашел в этой области видимого пламени, то пометить событие как «скрытый перегрев». Или: «Объект считается подтвержденным человеком, только если его одновременно детектировали и тепловая, и RGB-системы». Такой подход максимально использует сильные стороны каждого сенсора и повышает общую надежность системы.

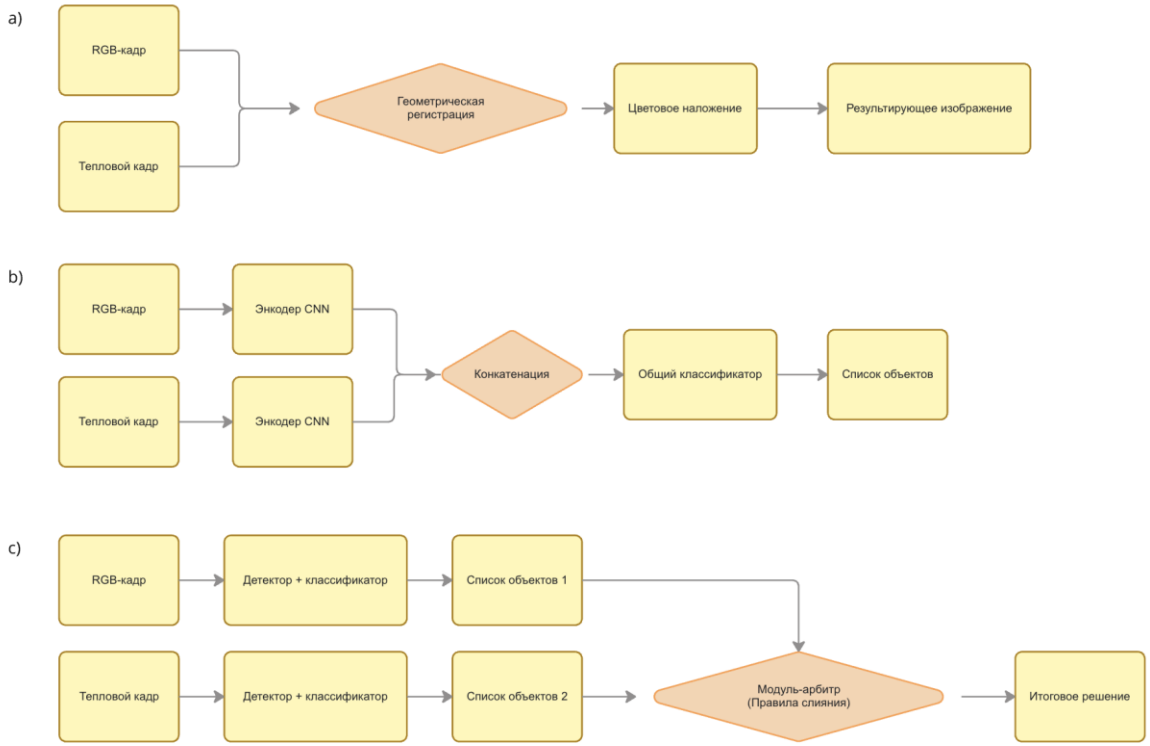


Рис. 1. Упрощенная схема архитектур слияния данных на разных уровнях: (a) пиксельное слияние, (b) слияние на уровне признаков в нейронной сети, (c) слияние на уровне решений.

Ключевыми техническими вызовами остаются: влияние погодных условий (дождь, ветер) на тепловую сигнатуру; нехватка крупных размеченных датасетов для тренировки моделей глубокого обучения на тепловых данных; необходимость обработки в реальном времени на борту БПЛА (edge computing). Перспективным направлением является интеграция с другими типами данных, например, мультиспектральными, для вычисления вегетационных индексов. Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), рассчитываемый по отражению в красном (R) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах, является классическим примером слияния спектральных каналов для оценки состояния растительности:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

Аналогичный подход применим и для создания комплексных показателей на основе RGB и тепловых данных.

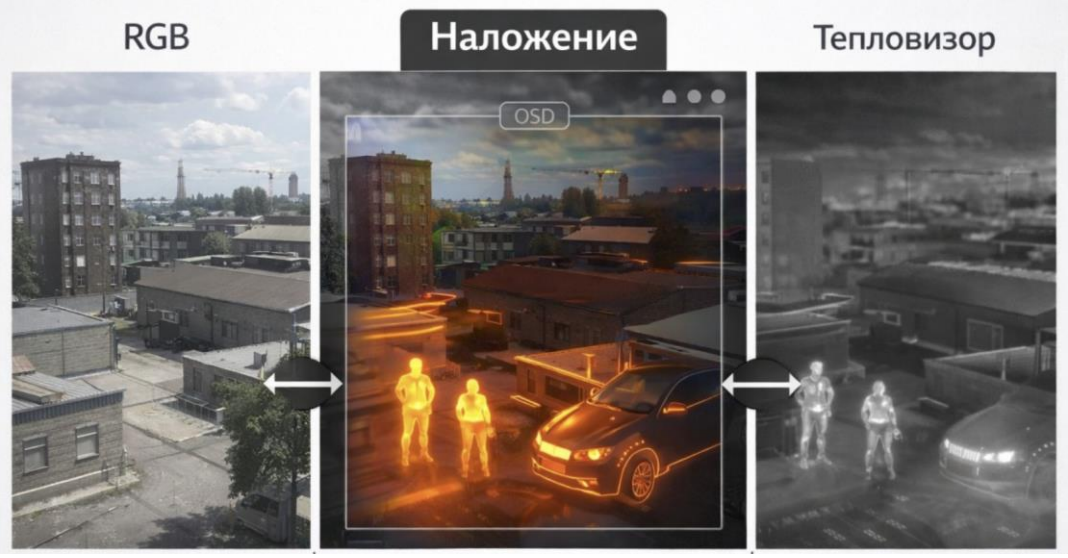


Рис. 2. Слияние данных от оптических и тепловизионных камер на борту БПЛА

Слияние данных от оптических и тепловизионных камер на борту БПЛА представляет собой мощный метод преодоления ограничений, присущих каждому типу сенсоров в отдельности. От точной геометрической регистрации до выбора стратегии объединения – каждый этап направлен на создание информационно обогащенного представления сцены. Внедрение методов слияния на уровне признаков и решений, поддерживаемых алгоритмами глубокого обучения, позволяет перейти от простой визуализации к семантически насыщенной аналитике. Это трансформирует БПЛА из устройства для сбора данных в интеллектуальную платформу для принятия решений в таких критически важных областях, как обеспечение безопасности, мониторинг инфраструктуры и экологический контроль. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание адаптивных алгоритмов, устойчивых к изменяющимся условиям среды, и оптимизацию вычислительных процессов для работы в реальном времени.

Список используемых источников

1. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22, № 11. P. 1330–1334. [EDN: SGZQAT, DOI: 10.1109/34.888718].

2. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 779–788. [EDN: XBGFJT, DOI: 10.1109/CVPR.2016.91].

3. Kwasniewska A., Ruminski J., Rad P. Fusion of Visible and Thermal Images for Person Detection // 2018 11th International Conference on Human System Interaction (HSI). 2018. P. 38–44. [EDN: WZHLXJ, DOI: 10.1109/HSI.2018.8431324].

4. Коростелев Е. Ю., Сидоров К. В. Применение тепловизионной съемки с БПЛА для мониторинга объектов электроэнергетики // Известия высших учебных заведений.

Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 5–6. С. 110–120. [EDN: VECSYQ, DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-110-120].

5. Li J., Xu W., Liu C., Wang Q. A Real-Time Fire Detection Algorithm for UAV-Based Forest Fire Monitoring // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 147508–147521. [EDN: HMYZSV, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014660].

METHODS OF MERGING DATA FROM VISIBLE AND INFRARED SENSORS INSTALLED ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Pavlovskaya A., Pavlovsky M., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses methods for merging RGB and thermal imaging camera data on UAVs. It analyzes three key strategies: pixel-level merging, feature-level merging, and decision-level merging, as well as the mandatory stage of geometric registration. The article identifies areas of effective application and formulates the main technological challenges. It shows that a comprehensive approach to data merging enhances the reliability of video analytics for infrastructure monitoring and search and rescue operations.

Key words: unmanned aerial vehicle, thermal video, data fusion, RGB, geometric registration, video analytics, anomaly detection, computer vision

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

СКВОЗНОЙ КОНВЕЙЕР ОБРАБОТКИ ВИДЕО С БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТА

А. А. Павловская, М. В. Павловский, С. Л. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье проведен анализ алгоритмов онлайн-отслеживания Simple Online and Realtime Tracking и DeepSORT для обработки видео с беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены архитектура, методы сопоставления объектов и адаптация к условиям аэросъемки. Даны рекомендации по выбору алгоритма на основе требований к точности и скорости обработки. требований к точности и вычислительной эффективности.

компьютерное зрение, обработка видео, беспилотные летательные аппараты, отслеживание объектов, SORT, DeepSORT, фильтр Калмана

Широкое внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга территорий, транспортных потоков и объектов критической инфраструктуры порождает необходимость в автоматизированной обработке больших объемов видеоданных. Ключевой задачей такого анализа является не только детектирование объектов в отдельных кадрах, но и их устойчивое отслеживание во времени для построения траекторий, расчета скоростей и анализа поведения [1]. Однако видеопоток с борта БПЛА характеризуется рядом дестабилизирующих факторов: паразитными колебаниями платформы, изменяющимся ракурсом и масштабом съемки, а также малым угловым размером наблюдаемых объектов, что предъявляет особые требования к алгоритмам трекинга [2].

В настоящее время доминирующей парадигмой является Tracking-by-Detection, где трекинг разделен на два независимых этапа: детектирование объектов в каждом кадре и последующее связывание этих детекций во времени. В рамках данного подхода алгоритмы SORT и DeepSORT зарекомендовали себя как эффективные решения для онлайн-обработки. Целью данной работы является проведение сравнительного анализа данных алгоритмов, оценка их устойчивости к характерным для аэросъемки вызовам и формулировка рекомендаций по их применению в практических задачах.

Алгоритм SORT позиционируется как простое и быстрое решение для онлайн-трекинга. Его работа представляет собой циклический четырехэтапный процесс, повторяющийся для каждого нового кадра видеопоследовательности [3].

На этапе прогнозирования состояние каждого активного трека экстраполируется в новый кадр с использованием дискретного фильтра Калмана. В стандартной реализации SORT используется модель постоянной скорости, где состояние объекта *x* описывается координатами центра ограничивающего прямоугольника его площадью, соотношением сторон и соответствующими скоростями:

$$x = [u, v, s, r, u', v', s']^{\mathrm{T}}, \quad (1)$$

где *u, v* – координаты цента, *s* – площадь прямоугольника, *r* – соотношение сторон, а *u',v', s'*- их производные по времени. Фильтр Калмана позволяет сгладить шум детектирования и предсказать вероятное положение объекта, что особенно важно при кратковременных пропусках детектора.

Следующий этап – сопоставление. Для установления соответствий между прогнозируемыми положениями треков и вновь обнаруженными детекциями используется метрика Intersection over Union (IoU). Данная метрика вычисляет степень перекрытия двух прямоугольников:

$$I_o U = \frac{Area(B_p \cap B_d)}{Area(B_p \cup B_d)}, \quad (2)$$

где B_p – прогнозируемый bounding box, B_d детектированный bounding box. На основе матрицы попарных значений $\mathrm{I_oU}$ решается задача оптимального назначения с помощью Венгерского алгоритма, который максимизирует суммарное пересечение.

Главным достоинством SORT является его вычислительная эффективность, позволяющая обрабатывать сотни объектов в реальном времени. Однако алгоритм обладает фундаментальными недостатками: высокой чувствительностью к качеству детектора и неспособностью надежно различать объекты при их взаимных окклюзиях, поскольку опирается исключительно на геометрическую информацию.

Алгоритм DeepSORT был разработан как прямое развитие SORT для преодоления его ключевых ограничений, прежде всего – неспособности справляться с длительными окклюзиями и перепутыванием идентификаторов [4].

Архитектурным усовершенствованием стало введение модуля извлечения признаков внешнего вида (appearance descriptor). Для каждой детекции

небольшая предобученная сверточная нейронная сеть генерирует вектор-дескриптор a_i, нормализованный по евклидовой норме. Этот дескриптор кодирует визуальную информацию об объекте (цвет, текстуру, форму), инвариантную к его положению.

Процесс сопоставления в DeepSORT становится двухэтапным и использует гибридную метрику. Помимо геометрической меры (I_oU или расстояния Махаланобиса, основанного на предсказании фильтра Калмана), вводится метрика по внешности – минимальное косинусное расстояние между дескрипторами трека и детекции:

$$d(i,j) = min\{1 - a_j^T a_k^{(i)} | a_k^{(i)} \in A_i\}, \quad (3)$$

где A_i – галерея последних дескрипторов i-го трека. Итоговая матрица стоимостей для Венгерского алгоритма является взвешенной суммой обеих метрик. Для управления жизненным циклом треков в условиях окклюзий в DeepSORT реализован механизм каскадного сопоставления, который дает приоритет в сопоставлении трекам, дольше остающимся неподтвержденными.

Специфика видеопотока с БПЛА создает уникальные вызовы для любого алгоритма трекинга: объекты могут стремительно менять масштаб и ракурс, их изображение часто занимает менее 100 пикселей, а сложный фон усугубляет проблему схожести дескрипторов разных объектов. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная характеристика алгоритмов SORT и DeepSORT в контексте обработки видео с БПЛА

Критерий	SORT	DeepSORT
Основная информация	Геометрия (положение, размер)	Геометрия + признаки внешнего вида
Устойчивость к окклюзиям	Низкая	Средняя/высокая
Точность ID (MOTA)	Средняя, высокий уровень перепутывания ID	Высокая
Вычислительная сложность	Низкая	Средняя (зависит от сети извлечения признаков)
Критическая зависимость	От качества и частоты работы детектора	От качества детектора и репрезентативности признаков внешности

Алгоритм SORT целесообразно применять в системах, где приоритетом является максимальная скорость обработки, а требования к сохранению идентификаторов объектов нестроги. Примеры: подсчет общего количества транспортных средств на магистрали, детектирование факта перемещения в зоне наблюдения. Его эффективность напрямую зависит от стабильности и точности работы предшествующего детектора, такого как YOLO или SSD.

Алгоритм DeepSORT следует выбирать для задач, требующих долгосрочной и точной ассоциации объектов, особенно в сценариях с частыми взаимными перекрытиями. Это актуально для мониторинга активности на стройплощадке (отслеживание конкретных единиц техники), анализа конфликтных ситуаций на перекрестках или ведения подсчета уникальных объектов. Необходимо учитывать, что сеть извлечения признаков требует вычислительных ресурсов и должна быть дообучена на данных, репрезентативных для условий аэросъемки, чтобы обеспечить инвариантность к изменяющемуся ракурсу.

В работе проведен сравнительный анализ двух поколений алгоритмов онлайн-трекинга – SORT и DeepSORT – в контексте их применения для обработки видео с БПЛА. Показано, что классический SORT остается актуальным решением для систем с жесткими ограничениями по вычислительным ресурсам, где допустимы ошибки в идентификации. Алгоритм DeepSORT, интегрирующий глубокие признаки внешнего вида, предлагает качественно новый уровень точности и устойчивости к окклюзиям, что делает его предпочтительным выбором для сложных аналитических задач.

Перспективными направлениями развития являются оптимизация сетей извлечения признаков для работы на edge-устройствах, адаптация моделей движения фильтра Калмана к нелинейной динамике объектов, наблюдаемых с БПЛА, а также слияние информации от трекера с данными семантической сегментации для повышения контекстной осведомленности системы.

Список используемых источников

1. Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple Online and Realtime Tracking // 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2016. P. 3464–3468. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533003.

2. Wojke N., Bewley A., Paulus D. Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric // 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017. P. 3645–3649. DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962.

3. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement // arXiv preprint. 2018. arXiv:1804.02767.

4. Liu W. et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector // European Conference on Computer Vision (ECCV). 2016. P. 21–37. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.

END-TO-END VIDEO PROCESSING CONVEYOR FOR UAV MONITORING OF TRANSPORT

Pavlovskaya A., Pavlovsky M., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article analyzes the Simple Online and Realtime Tracking and DeepSORT algorithms for processing video from unmanned aerial vehicles. It discusses the architecture, object matching methods, and adaptation to aerial photography conditions. The article provides recommendations for choosing an algorithm based on the requirements for accuracy and processing speed.

Key words: computer vision, video processing, unmanned aerial vehicles, object tracking, SORT, DeepSORT, Kalman filter

УДК 621.391.8
ГРНТИ 3.49.25

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ РЭЛЕЕВСКОГО И РАЙСОВСКОГО MIMO–КАНАЛОВ

А. А. Пелин, Н. В. Савищенко

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В данной статье рассматриваются вопросы анализа спектральной эффективности (пропускной способности) систем беспроводной связи с множественным входом и множественным выходом MIMO (Multiple–Input Multiple–Output). Особое внимание уделяется различиям в моделировании каналов с рэлеевскими замираниями (отсутствие прямой видимости) и замираниями Райса (наличие компонента прямой видимости). Исследование базируется на свойствах случайных матриц, а именно центральных и нецентральных комплексных матриц Уишарта. Описывается подход к расчету статистики пропускной способности, основанный на многомерных и одномерных функциях плотности вероятности (PDF) собственных чисел канальных матриц, что позволяет получить точные аналитические выражения имитационного моделирования.

MIMO, пропускная способность канала, замирания Рэлея, замирания Райса, матрицы Уишарта, собственные числа, K–фактор.

Введение. Современные стандарты беспроводной связи (5G и разрабатываемые 6G) предъявляют экспоненциально растущие требования к скорости передачи данных и надежности соединения. Ключевой технологией, обеспечивающей высокую спектральную эффективность, является технология MIMO, использующая антенные решетки как на стороне передатчика, так и на стороне приемника. Фундаментальным свойством MIMO является возможность пространственного мультиплексирования, при котором информационный поток разделяется на несколько параллельных подпотоков, передаваемых одновременно в одной полосе частот.

Пропускная способность (емкость) MIMO–канала является случайной величиной, зависящей от мгновенного состояния среды распространения радиоволн. Традиционный анализ часто ограничивается предположением об идеальных рэлеевских замираниях (модель Ричарда–Вольфа) [1, 2], которые характерны для сред с сильным многолучевым рассеянием (Rich Scattering environment). Однако в реальных условиях, особенно в микросотовых городских сетях и сетях малого радиуса действия, часто присутствует

компонент прямой видимости (Line–of–Sight, LOS), что требует использования модели замираний Райса [3, 4].

Исторически анализ райсовских каналов был значительно сложнее из–за математических трудностей, связанных с ненулевым средним значением матрицы канала. Целью данной работы является систематизация аналитических методов оценки пропускной способности каналов Рэлея и Райса, опираясь на теорию случайных матриц (Random Matrix Theory, RMT) и свойства комплексных матриц Уишарта (Central and Non–Central Complex Wishart Matrices) [5, 6]. Рассматриваемый подход, основанный на точном знании функции плотности вероятности (PDF) собственных чисел корреляционной матрицы канала, позволяет уйти от грубых оценок и получить точные характеристики системы.

Канал связи MIMO – математическая модель. Рассмотрим однопользовательскую систему MIMO с L_t передающими и L_r приемными антеннами: MIMO ($L_t \times L_r$). Передача сигнала в узкополосном канале (или на одной поднесущей OFDM) может быть описана линейным матричным уравнением:

$$y = Hx + n, \tag{1}$$

где $y \in \mathbb{C}^{L_r \times 1}$– вектор принимаемого сигнала, $x \in \mathbb{C}^{L_t \times 1}$– вектор передаваемого сигнала. Предполагается, что энергия символа нормирована, и полная мощность передатчика равна P_s, $H \in \mathbb{C}^{L_r \times L_t}$– матрица канальных коэффициентов, где элемент h_{ij} описывает комплексный коэффициент передачи от j–й передающей к i–й приемной антенне, $n \in \mathbb{C}^{L_r \times 1}$ – вектор аддитивного белого гауссовского шума (AWGN) с нулевым средним и ковариационной матрицей $\sigma_n^2 E L_r$ где E– единичная матрица. Отношение сигнал/шум (SNR) на каждой приемной антенне можно определить как $\rho = P_s/\sigma_n^2$. При условии, что передатчик не обладает информацией о состоянии канала (CSI), оптимальной стратегией является равномерное распределение мощности между антеннами. В этом случае ковариационная матрица передаваемого сигнала принимает вид $Q = E[xx^H] = \frac{P}{L_t} E L_t$ [1]. Статистические свойства матрицы H определяют всю производительность системы, и именно здесь лежит фундаментальное различие между каналами с замираниями Рэлея и Райса.

Канал с замираниями Рэлея и Райса. При моделировании канала матрица H считается случайной. В общем виде она может быть разложена

на детерминированную (постоянную) часть и стохастическую (рассеянную) часть.

Замирания Рэлея (Rayleigh Fading). Данная модель применяется, когда между передатчиком и приемником отсутствует прямая видимость, а сигнал формируется исключительно за счет многократных переотражений от местных объектов. В этом случае все элементы матрицы H являются независимыми, одинаково распределенными (i.i.d.) комплексными случайными величинами с круговой симметрией и нулевым средним: $h_{ij} \sim CN(0,1)$. Это классический случай, приводящий к центральному распределению Уишарта [4].

Замирания Райса (Ricean Fading). Когда присутствует доминирующий путь распространения (компонент LOS), элементы матрицы H больше не имеют нулевого среднего. Канальная матрица моделируется как [3]:

$$H = \sqrt{\frac{K}{K+1}}\bar{H} + \sqrt{\frac{1}{K+1}}H_{\varpi}, \quad (2)$$

где K – коэффициент Райса, представляющий отношение мощности компонента прямой видимости к мощности рассеянного компонента; $\bar{H}$– детерминированная матрица (компонент прямой видимости), обычно ранга 1 для LOS; H_{ϖ}– матрица случайных коэффициентов рассеяния с распределением элементов $CN(0,1)$. При $K = 0$ модель вырождается в замирания Рэлея. При $K \to \infty$ канал становится детерминированным (аддитивный гауссовский канал без замираний). В данном контексте случайная матрица H имеет ненулевое математическое ожидание $E[H] = \sqrt{\frac{K}{K+1}}\bar{H}$, что значительно усложняет анализ ее спектральных характеристик.

Статистическое описание канала на основе распределения Уишарта. Для корректного статистического моделирования беспроводных каналов с многоэлементными антенными решетками необходимо использовать аппарат многомерного статистического анализа. Как подробно рассмотрено в [5] ковариационные свойства MIMO–канала описываются матричными произведениями вида эрмитова сопряжения, которые подчиняются комплексному распределению Уишарта.

Пусть матрица H представляет собой совокупность n независимых столбцов x_k, каждый из которых имеет многомерное нормальное распределение. Формируя матрицу выборочной ковариации W (в терминологии обозначаемую как Z при $n \geq p$), приходим к семейству распределений для сим-

метричных положительно определенных матриц. В этом случае случайная матрица

$$Z = \sum_{k=1}^{n} x_k \, x_k^H \tag{3}$$

имеет центральное распределение Уишарта с n степенями свободы, что обозначается как $Z \sim C\mathcal{W}_p(n, \Sigma)$, где Σ– ковариационная матрица. Если замирания в антеннах некоррелированы $\Sigma = E$, где E– единичная матрица, распределение называется стандартным: $Z \sim \mathcal{W}_p(n, \Sigma)$.

Плотность вероятности для такой матрицы, необходимая для вывода формул пропускной способности, имеет вид:

$$f_W(Z) = \frac{|Z|^{n-p}}{\Gamma_p(n)|\Sigma|^n} exp\big(-tr(\Sigma^{-1}Z)\big), \tag{4}$$

где $\Gamma_p(n)$– многомерная гамма–функция; $|X| = det\, X$– детерминант матрицы X;$tr\, X$– след матрицы X.

Важным свойством, является то, что след матрицы tr(Z), представляющий собой сумму мощностей в ветвях разнесения, распределен по закону χ^2 (хи–квадрат) с np степенями свободы. Более того, при анализе метода обнуления ZF (Zero Forsing) показано, что отношение сигнал/шум $\gamma_к$ в k–м потоке подчиняется масштабированному χ^2–распределению с $2(L_r - L_t + 1)$ степенями свободы. Это свойство позволяет переходить от матричных интегралов к скалярным при расчете характеристик эргодической емкости для ZF–приемников.

Нецентральное распределение Уишарта (MIMO–канал Райса). При наличии компонента прямой видимости (LOS) математическое ожидание канальной матрицы не равно нулю: $M \neq 0$. Матрица Z в этом случае описывается нецентральным распределением Уишарта $Z \sim \mathcal{W}_p(n, \Sigma, \Delta)$ с матрицей нецентральности Δ. Параметр нецентральности определяется через матрицу средних значений M как:

$$\Delta = \Sigma^{-1} M M^H \, . \tag{5}$$

Функция плотности распределения вероятностей (PDF) для нецентральной матрицы Уишарта, описывающей статистику райсовского MIMO–канала, имеет существенно более сложную структуру и выражается через гипергеометрическую функцию матричного аргумента ${}_0F_1$ [6]:

$$f_W(Z) = \frac{|Z|^{n-p}}{\Gamma_p(n)|\Sigma|^n} exp\big(-tr(\Sigma^{-1}Z + \Delta)\big)_0 F_1(n; \Delta\Sigma^{-1}Z). \quad (6)$$

Здесь $0F_1(n; X)$ – скалярная функция от матричного аргумента, которая раскладывается в ряд по зональным полиномам. Анализ, проведенный [2, 5], показывает, что именно матрица Δ »сдвигает» распределение собственных чисел, увеличивая их средние значения (что соответствует росту SNR за счет LOS компонента), но одновременно меняет форму распределения, делая ее отличной от χ^2.

Применение этого математического аппарата является строгим условием для точного расчета пропускной способности. Если для центрального случая пропускная способность может быть аппроксимирована на основе свойств χ^2, то для райсовского канала необходимо численное интегрирование выражения с функцией $0F_1(n; X)$ или использование аппроксимаций, связывающих нецентральное распределение с центральным, но с измененными параметрами эффективных степеней свободы.

Пропускная способность системы MIMO. Классическое определение эргодической пропускной способности системы MIMO в каналах с замираниями требует вычисления математического ожидания [1]:

$$\mathrm{C} = \mathrm{E}\left[\sum_{i=1}^{min(L_t,L_r)} log_2(1 + \rho\lambda_i)\right], \quad (7)$$

где λ_i – неупорядоченные собственные числа матрицы Уишарта W, а ρ – нормированное отношение сигнал/шум. В большинстве существующих работ этот интеграл берется численно или оценивается методами Монте–Карло.

Однако для практической реализации и быстрой оценки эффективности системы необходимо получение замкнутого аналитического решения. Рассмотрим случай системы с количеством приемных антенн $L_r \geq 2$. На основе свойств собственных чисел матрицы $\Sigma^{-1}(E - \frac{1}{L_r}\Omega)$, где E – единичная матрица,

Ω – матрица параметров нецентральности, можно выделить два характеристических числа ψ_1 и ψ_2, определяющих поведение спектра канала.

Опираясь на полученные аналитические преобразования плотности вероятности, верхняя граница пропускной способности *C* выражается через комбинацию специальных интегральных функций $J(n, \rho, a)$ после несложных преобразований выглядит следующим образом [6]:

$$C \le \frac{(det\,\Sigma)^{-L_r}\,etr(-\Omega)}{\psi_2-\psi_1}\times \quad (8)$$

$$\times\left[\frac{\psi_2^{-L_r+1}}{\Gamma(L_r)}J(L_r^{-1},\psi_1,\rho)-\frac{\psi_2^{-L_r}}{\Gamma(L_r-1)}J(L_r-1,\psi_2,\rho)+\frac{\psi_1^{-L_r}}{\Gamma(L_r-1)}J(L_r-2,\psi_2,\rho)-\frac{\psi_1^{-L_r+1}}{\Gamma(L_r)}J(L_r-1,\psi_2,\rho)\right]$$

где $\mathrm{etr}(X)=exp\big(\mathrm{Tr}(X)\big)$ – след матрицы; $\Gamma(z)$– гамма функция.

Ключевым элементом предложенного подхода является функция $J(n,p,a)$, которая описывает вклад каждого мода (собственного числа) в общую емкость. Исходный интеграл имеет вид [6]:

$$J(n,p,a)=\int_0^\infty x^n e^{-px}\,log(1+ax)dx \quad (9)$$

Аналитическое решение данного интеграла позволяет избежать численного интегрирования и сводится к конечной сумме, включающей интегральную показательную функцию [7, 4.337.5]:

$$J(n,p,a)=\frac{1}{pa^n}\sum_{k=0}^{n}(-1)^{n-k+1}\frac{n!}{(n-k)!}\left(\frac{a}{p}\right)^k\left[e^{\frac{p}{a}}Ei\left(-\frac{p}{a}\right)-\sum_{m=1}^{n-k}(m-1)!\left(-\frac{a}{p}\right)^m\right] \quad (10)$$

Здесь $\mathrm{Ei}(z)=-\int_z^\infty\frac{e^{-t}}{t}dt=\int_{-\infty}^{z}\frac{e^t}{t}dt$– интегральная показательная функция, $L_r\ge 2$ два входа$(2\times L_r)$, ψ_1иψ_2– собственные значения матрицы. $\Sigma^{-1}-\Omega\Sigma^{-1}/L_r$

Полученное выражение связывает параметры физического канала (ψ_1,ψ_2 зависящие от ковариационной матрицы Σ и *K*–фактора Райса через матрицу Ω) и системные параметры (отношение сигнал/шум ρ и количество антенн L_r).

Результаты численного моделирования, выполненного на основе полученных аналитических выражений (8-10), представлены на рис. 1.

Сравнительный анализ графиков пропускной способности позволяет сделать следующие выводы о влиянии статистики канала на эффективность системы MIMO:

Общая динамика. Для обоих типов каналов наблюдается логарифмический рост пропускной способности с увеличением SNR, что согласуется с фундаментальной теорией информации Шеннона. Однако наклон кривых (мультиплексный выигрыш) различается в зависимости от свойств матрицы канала.

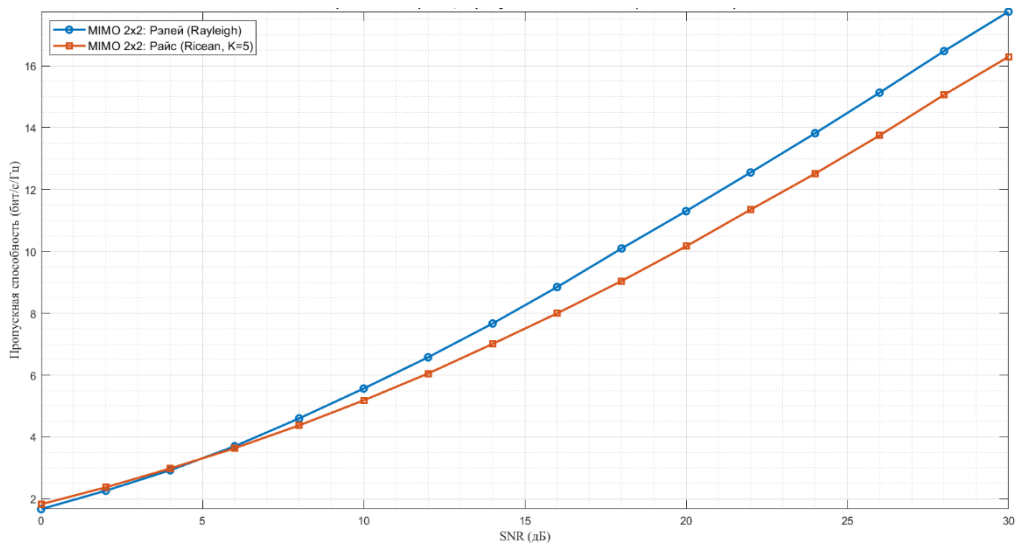


Рис. 1. Зависимость эргодической пропускной способности системы MIMO 2×2 от отношения сигнал/шум для каналов с замираниями Рэлея и Райса

Эффект «Rank Deficiency» при высоком SNR. При высоких значениях отношения сигнал/шум (SNR > 15 дБ) канал с рэлеевскими замираниями (синяя кривая) демонстрирует преимущество перед каналом Райса (красная кривая). Это объясняется тем, что идеальный рэлеевский канал характеризуется «богатым рассеянием» (Rich Scattering), что обеспечивает полную ранговость матрицы канала с высокой вероятностью. В то же время наличие сильного компонента прямой видимости (LOS) при K = 5 в канале Райса приводит к высокой корреляции между подканалами. Это увеличивает разброс собственных чисел матрицы W (одно собственное число доминирует над остальными), что снижает эффективное число пространственных потоков данных. Матрица стремится к вырожденной (ранг 1), ограничивая потенциал пространственного мультиплексирования.

Область низких SNR. В области низких значений SNR (0–5 дБ) пропускная способность канала Райса сопоставима с каналом Рэлея. Здесь доминирующую роль играет энергетический выигрыш от когерентного сложения сигнала в компоненте прямой видимости (array gain), который компенсирует недостаток пространственных степеней свободы.

Таким образом, графики подтверждают, что использование аналитического подхода на основе распределения собственных чисел матриц Уишарта позволяет точно предсказывать «эффект насыщения» степеней свободы в условиях прямой видимости, который невозможно обнаружить при использовании простых моделей каналов без учета корреляции.

На рис. 2 продемонстрировано фундаментальное преимущество систем MIMO – эффект пространственного мультиплексирования. Как видно из графиков, наклон кривой пропускной способности прямо пропорционален минимальному числу антенн в системе $\min(L_t, L_r)$.

Для системы SISO зависимость носит логарифмический характер $C \sim \log_2(SNR)$, тогда как для системы MIMO 4×4 наклон увеличивается в 4 раза. Это подтверждает теоретические выводы о том, что собственные числа случайных матриц Уишарта (которых в случае 4×4 будет четыре) формируют параллельные независимые подканалы передачи данных.

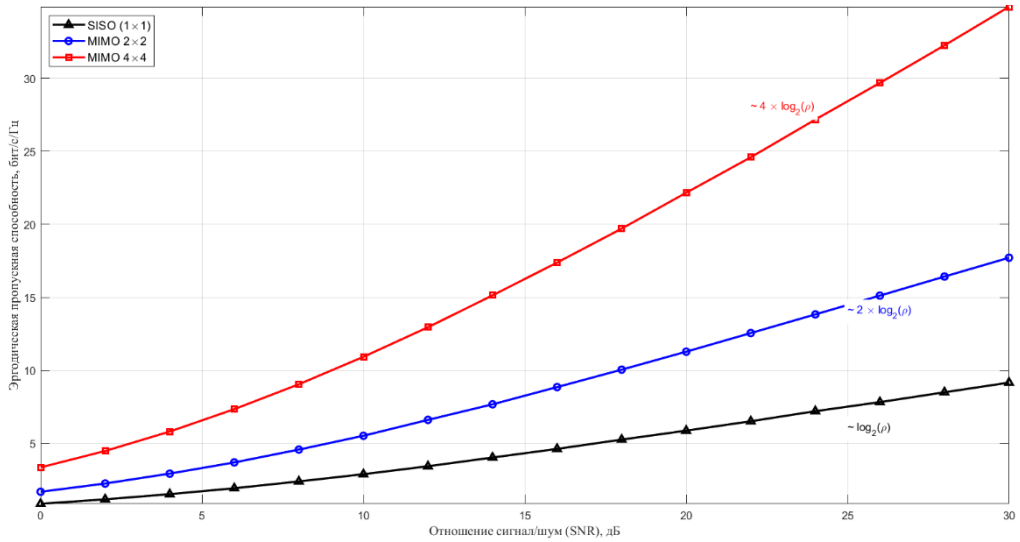


Рис. 2. Сравнительный анализ эргодической пропускной способности систем SISO и MIMO различных конфигураций (2×2,4×4) в условиях рэлеевских замираний

Заключение. В статье проведен обзор математического аппарата для оценки пропускной способности MIMO–каналов в условиях рэлеевских и райсовских замираний. Продемонстрировано, что анализ пропускной способности сводится к изучению статистических свойств собственных чисел матриц Уишарта: центральных для рэлеевских каналов и нецентральных для каналов с компонентом прямой видимости.

Главным выводом является важность использования точных аналитических выражений для плотности вероятности собственных чисел. Использование нецентральных матриц Уишарта позволяет строго математически описать поведение систем связи в условиях смешанных условий распространения. Подход, основанный на функциях распределения (PDF–based approach), дает инженерам мощный инструмент для оптимизации MIMO–систем, позволяя предсказывать вероятность сбоя (outage probability) и эр-

годическую емкость без длительного моделирования методом Монте–Карло.

Практическая ценность данного анализа возрастает с переходом к сетям 5G и 6G, где использование микросот и миллиметрового диапазона волн делает модель замираний Райса доминирующей, а количество антенн требует учета их взаимных корреляций, описываемых теорией матриц Уишарта.

Список используемых источников

1. Telatar I. E. Capacity of Multi–antenna Gaussian Channels // European Transactions on Telecommunications. 1999. Vol. 10, no. 6. P. 585–595.

2. McKay M. R., Collings I. B. General Capacity Bounds for Spatially Correlated Rician MIMO Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2005. Vol. 51, N 9. P. 3121–3145.

3. Kang M., Alouini M. S. Capacity of MIMO Rician Channels With Distinct Line–of–Sight Components // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2006. Vol. 5, N 6. P. 1383–1394.

4. Tulino A. M., Verdú S. Random Matrix Theory and Wireless Communications // Foundations and Trends in Communications and Information Theory. 2004. Vol. 1, N 1. P. 1–182.

5. Савищенко Н. В., Пелин А. А. Распределение Уишарта для анализа помехоустойчивости приема многоантенных систем беспроводной связи // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: материалы международ. науч. конф., Воронеж, 1–3 декабря 2025 г. Воронеж, Изд-во ВГУ, 2025 С. 832–839.

6. Ратнараджа Т., Вальянкур Р., Алво М. Комплексные случайные матрицы и пропускная способность райсовского канала // Проблемы передачи информации. 2005. Т. 41. № 1. С. 3–29.

7. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, рядов и произведений / под ред. А. Джеффри, Д. Цвиллингера. – 7-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 1768 с.

CAPACITY OF RAYLEIGH AND RICIAN MIMO CHANNELS

Pelin A., Savishchenko N.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This paper addresses the analysis of the spectral efficiency (capacity) of wireless communication systems with multiple inputs and multiple outputs (MIMO). Particular attention is given to the differences in modeling channels with Rayleigh fading (absence of line-of-sight) and Rician fading (presence of a line-of-sight component). The research is based on the properties of random matrices, namely central and non-central complex Wishart matrices. An approach to calculating capacity statistics is described, based on the joint and marginal probability density functions (PDF) of the eigenvalues of channel matrices, which allows for obtaining exact analytical expressions without resorting to extensive simulation.

Key words: MIMO, channel capacity, Rayleigh fading, Rician fading, Wishart matrices, eigenvalues, K-factor

УДК 621.341.572
ГРНТИ 45.37.31

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫМИ ФОРМИРОВАТЕЛЯМИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

А. А. Прасолов, Б. Г. Шамсиев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Важным инструментом в современном мире электроники является широтно-импульсная модуляция, с помощью которой становится возможным управление уровнем электрического сигнала путем изменения относительной длительности импульсов. По сравнению с аналоговым методом формирования широтно-импульсной модуляции, цифровой способ обеспечивает более высокую точность, большую гибкость в управлении и лучшую устойчивость к помехам. В статье кратно изложен процесс разработки цифровой схемы управления формирователями гармонических колебаний на основе широтно-импульсно модулированного сигнала.

ШИМ, КПД, КФГК, спектр, микроконтроллер

Широко известными и подробно изученными являются формирователи гармонических колебаний (ФГК) на основе усилителей, работающих в режимах классов A, B, C. Недостаток таких формирователей состоит в невысоком КПД, который понижается с уменьшением амплитуды усиливаемых колебаний. Значительно снизить мощность потерь на активных приборах, а следовательно, и более высокие КПД удается получить в ФГК, работающих в ключевом режиме (класс D). На практике широко используются мостовые резонансные последовательные инверторы, схема которых приведена на рисунке 1.

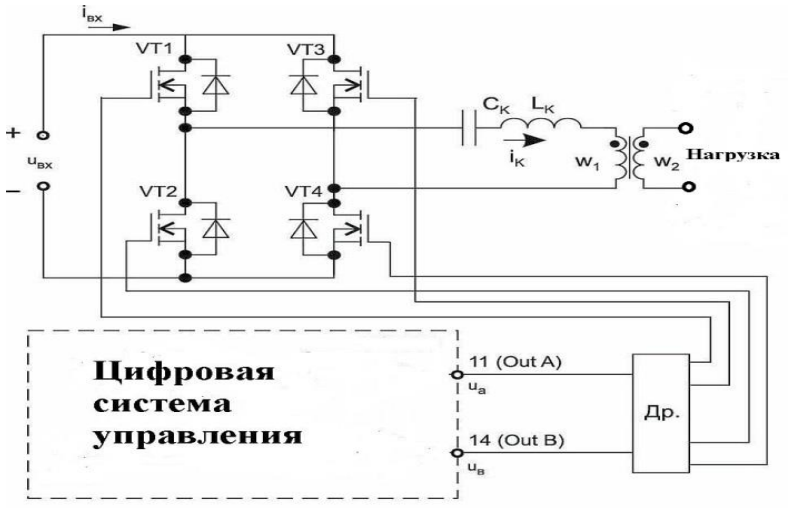


Рис. 1. Мостовая схема резонансного последовательного инвертора

Отмечая основные достоинства ключевых формирователей гармонических колебаний (КФГК): высокий электронный КПД, простота технической реализации, следует указать и на их основной недостаток – широкий спектр выходных колебаний. Последнее обстоятельство приводит к необходимости разработки и исследования специальных типов КФГК с уменьшенным содержанием гармоник выходных колебаний [1].

Формирование выходного напряжения с улучшенным спектральным составом производится непосредственно в КФГК (рис. 1). Транзисторы, попарно отпираясь (VT1, VT3) и запираясь (VT2, VT4), образуют прямоугольное напряжение с амплитудой, равной напряжению питания, при допущении, что внутреннее сопротивление источника питания и сопротивление транзисторов в открытом состоянии равны нулю [2]. Переключая транзисторы в этой схеме по определенному алгоритму, на выходе формирователя можно получить напряжения, формы которого приведены на рисунке 2.

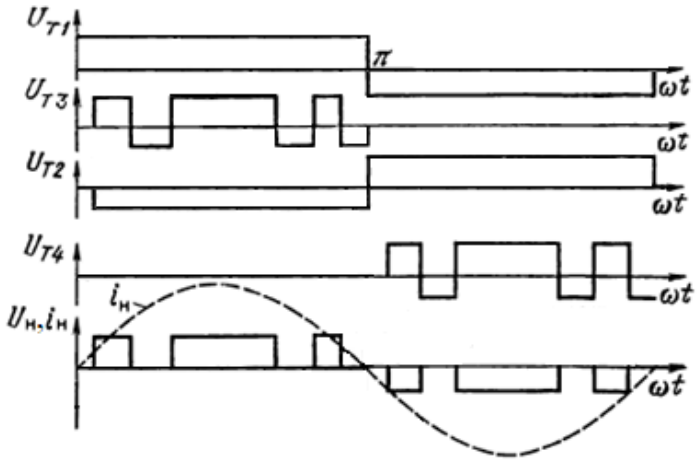


Рис. 2. Временные диаграммы работы мостовой схемы генератора с одноуровневым однополярным выходным напряжением

В ходе предложений по разработке цифровой схемы управления ключевыми формирователями гармонических колебаний будет рассматриваться метод прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesizer, ПЦС), основным преимуществом которого является то, что его выходную частоту, фазу и амплитуду можно точно и быстро настраивать под управлением цифрового процессора или микроконтроллера.

В основе предлагаемого алгоритма переключения транзисторов на заложен метод генерации синусоидального сигнала с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), поскольку он отличается простотой реализации, обеспечивает контроль параметров и позволяет регулировать спек-

тральный состав в сочетании с выбранной схемотехнической конфигурацией – мостовой схемой последовательного инвертора (рисунок 1) с одноуровневым однополярным напряжением (рисунок 2).

Для реализации данного алгоритма можно воспользоваться большим классом различных микроконтроллеров, так, например, во многих микроконтроллерах Atmel есть несколько таймеров, и обычно у каждого из них есть два для работы в режиме ШИМ (например, в ATmega 328). Другой популярный пример – STM32F051R8, который имеет целых 11 таймеров, и у многих из них есть несколько каналов с ШИМ. Микроконтроллеры Texas Instruments на базе архитектуры ARM обычно имеют отдельные модули ШИМ и таймера (например, TM4C123GH6PM).

С одной стороны, формирование ШИМ сигнала с помощью микроконтроллера не является какой-то новой задачей, так как, для получения синусоидального напряжения 50 Гц в канале необходимо использовать высокочастотное изменение коэффициента ШИМ с частотой всего 18 кГц, на которую настроен системный таймер. Синусоида формируется методом ПЦС с шагом 1 градус. С другой стороны, мы имеем дело с мощными транзисторами, в которых максимально возможная частота ШИМ может быть сильно ограничена. В итоге для подавления паразитных гармоник от ШИМ сигнала ложиться на фильтр, который не должен иметь высокий порядок в силу требований к инерционности.

Одна из идей, для подавления некоторых гармонических составляющих ШИМ сигнала за счет фазовой компенсации представленная в [3], заключается в том, чтобы генерировать сдвинутый по фазе сигнал, а не полагаться исключительно на сам фильтр. Очень похожую идею предлагает автор в [4], где формирование второго сигнала с задержкой по фазе происходит аналоговым способом. Но по факту, сама структура формирования сигнала ШИМ приобретает двухканальный режим. В [5] эта идея была расширена путем, использования большего числа каналов ШИМ с разной разностью фаз, чтобы получить больше точек с коэффициентом заполнения без пульсаций. Автор в [4] проведя эксперимент с формированием ШИМ в четырехканальном утверждает, что на выходе этого четырехканального ЦАП с широтно-импульсной модуляцией будет только 4-я гармоника базовой частоты ШИМ, и, как следствие, на выходе не будет пульсаций.

В качестве режима работы был выбран ШИМ с коррекцией фазы и частоты, который на спектрах выходных сигналов КФГК (рисунок 3) продемонстрировал значительно лучшие показатели (высшие гармоники спектра

находятся значительно дальше по частоте от основной гармоники, что способствует значительному снижению требований к выходному фильтру и отсутствию искажений формы импульсов) по сравнению с другими режимами работы.

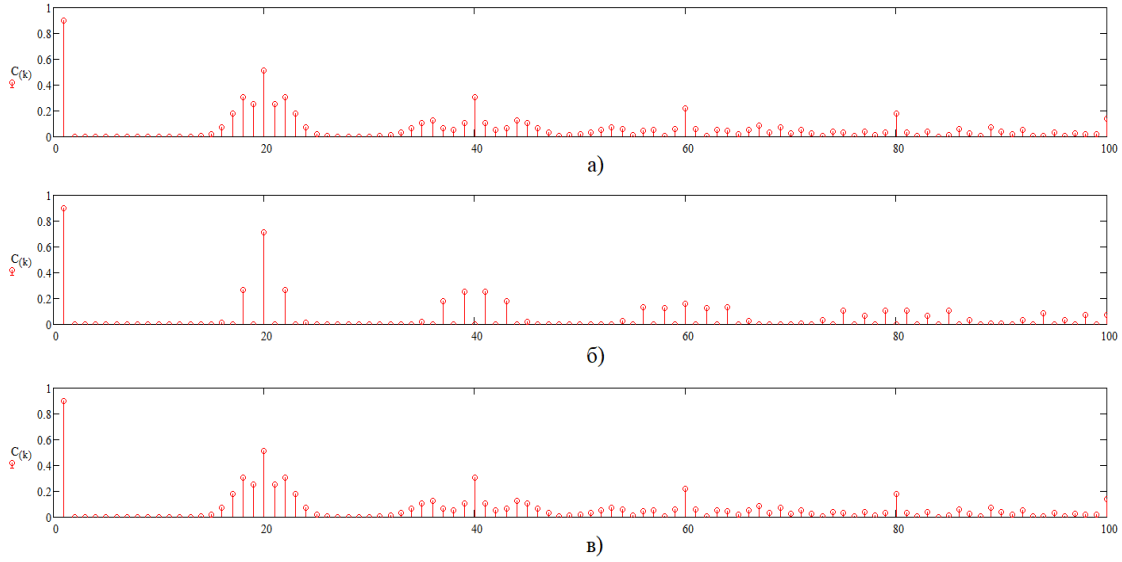


Рис. 3. Спектры выходных сигналов КФГК, аппроксимирующих гармоническое колебание с помощью линейно-возрастающей пилообразной несущей – режим быстрой ШИМ (а), симметричной пилообразной несущей – режимы ШИМ с коррекцией фазы и ШИМ с коррекцией фазы и частоты (б), а также линейно-убывающей пилообразной несущей (в) при одноуровневом однополярном напряжении

При увеличении числа каналов для уменьшения пульсаций можно использовать многоканальный вариант ШИМ, но он может потребовать перехода от использования микроконтроллеров к микросхемам CPLD и FPGA.

В результате была предложена цифровая схема управления ключевыми формирователями гармонических колебаний в многоканальном режиме. В качестве схемотехнического решения была выбрана мостовая схема резонансного последовательного инвертора с одноуровневым однополярным напряжением, в качестве блока цифрового формирования ШИМ для переключения транзисторов может быть выбран как микроконтроллер, так и при определенных случаях CPLD и FPGA.

Список используемых источников

1. Дмитриков В. Ф., Петяшин Н. Б., Сиверс М.А. Высокоэффективные формирователи гармонических колебаний. М.: Радио и связь, 1988. 192 с.

2. Шамсиев, Б. Г. Основы преобразовательной техники: учебное пособие / Б. Г. Шамсиев; СПбГУТ. Санкт-Петербург, 2023. 136 с.

3. Akküncü A. Double µC's PWM frequency & resolution // Design Ideas, 2017. URL: https://www.edn.com/double-µcs-pwm-frequency-resolution/ (дата обращения: 22.02.2026)

4. Woodward S. Cancel PWM DAC ripple with analog subtraction // Design Ideas, 2017. URL: https://www.edn.com/cancel-pwm-dac-ripple-with-analog-subtraction/ (дата обращения: 22.02.2026)

5. Akküncü A. Phased-array PWM DAC // Design Ideas, 2022. URL: https://www.edn.com/phased-array-pwm-dac/ (дата обращения: 22.02.2026)

DEVELOPMENT OF A DIGITAL CONTROL SCHEME FOR KEY SINEWAVE OSCILLATOR

Prasolov D., Shamsiev B.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication

An important tool in the modern world of electronics is pulse-width modulation, with which it becomes possible to control the power of an electrical signal by changing the pulse duration. Compared with the analog method of pulse width modulation generation, the digital method provides higher accuracy, greater flexibility in control and better resistance to interference. The article briefly describes the process of developing a digital control circuit for a harmonic oscillator based on a pulse-width modulated signal.

Key words: PWM, coefficient of efficiency, key sinewave oscillator, spectrum, microcontroller

УДК 621.396.969
ГРНТИ 47.49.31

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ В СЕТЯХ 5G NR С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ PRS

К. Е. Рютин, Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлена модель оценки местоположения пользовательского устройства в сетях пятого поколения с использованием метода наблюдаемой разности времени прибытия сигналов. Метод основан на обработке опорных сигналов позиционирования, одновременно передаваемых синхронизированными базовыми станциями. Результаты работы демонстрируют, что точность оценки местоположения существенно зависит от полосы опорных сигналов позиционирования и от расположения пользовательского устройства относительно базовых станций.

5G NR, PRS, OTDOA, позиционирование, определение местоположения

Введение

В работе представлена модель вычисления местоположения пользовательского устройства (UE – User Equipment) в сети базовых станций (БС, gNB – gNodeB) стандарта 5G New Radio (NR) с использованием опорных сигналов позиционирования (PRS – Positioning Reference Signal). Для оценки местоположения UE в двумерном пространстве применяется метод наблюдаемой разности времени прибытия сигналов (OTDOA – Observed Time Difference Of Arrival), основанный на мультилатерации.

Метод OTDOA относится к методам позиционирования в нисходящем канале связи (DL – DownLink). В его основе лежит измерение разности времени прибытия (TDOA – Time Difference Of Arrival) опорных сигналов PRS [1-2] от разных gNB, также известная как разность времени опорных сигналов (RSTD – Reference Signal Timing Difference). Согласно [3], RSTD определяется как относительная временная разница между сигналом от соседней gNB и сигналом от опорной gNB, которой может являться обслуживающая БС. Для формирования измерений RSTD, группа синхронизированных gNB, включая обслуживающую, одновременно передают сигналы PRS. Пользовательское устройство оценивает время прихода (TOA – Time of Arrival)

этих сигналов и для каждой пары станций вычисляет RSTD между соседней gNB_j и опорной gNB_i по формуле (1).

$$RSTD_{j,i} = TOA_j - TOA_i. \quad (1)$$

Каждое измерение RSTD задает уравнение гиперболы с фокусами в точках расположения соответствующей пары gNB, на которой гипотетически находится UE. Совокупность таких измерений образует систему уравнений гипербол. Решение этой системы, процесс мультилатерации, позволяет оценить координаты UE. Минимальный случай, требующий одной опорной и двух соседних gNB для позиционирования на плоскости, известен как трилатерация. На основе трех TOA вычисляются два значения RSTD, которые определяют две гиперболы. Пересечение этих гипербол дает оценку местоположения UE в двумерном пространстве.

1. Задание параметров модели

Первоначально задаются основные параметры модели: количество генерируемых OFDM-кадров стандартной длительности 10 мс, несущая частота (в Гц) и количество. Модель поддерживает конфигурацию сети с количеством gNB от 3 до 19, функционирующих на единой несущей частоте.

Далее выполняется конфигурация gNB, которая включает: 1) присвоение уникального физического идентификатора соты (PCI – Physical Cell Identity) каждой станции; 2) установку идентичных параметров OFDM-сигнала для всех gNB, включая интервал между поднесущими и длину циклического префикса; 3) определение единой схемы частотного распределения в общей ресурсной сетке.

Для исключения взаимных помех сигналы PRS от различных gNB разделяются во времени. Каждой gNB назначается уникальное начальное смещение в слотах. В представленной модели реализовано временное мультиплексирование, при котором передача PRS для каждой gNB осуществляется в каждом втором слоте, начиная с индивидуального начального смещения. Период передачи для всей сети задается как $T = 2 \cdot N$, где N – общее количество gNB. Данный период гарантирует бесконфликтное размещение ресурсных элементов PRS от всех станций в рамках одного временного цикла ресурсной сетки. Альтернативными методами предотвращения перекрытия сигналов являются частотное разделение, использование непересекающихся паттернов OFDM-символов или применение механизмов подавления определенных передач PRS.

Параметры конфигурации канала связи и температурного шума включают задание расстояния между gNB в метрах, которое определяет размер зоны покрытия. На основе этого расстояния генерируются начальные координаты размещения gNB и UE в пределах данной зоны. Модель потерь на трассе распространения соответствует сценарию городской макросоты (UMa – Urban Macrocell) в соответствии со рекомендацией [4]. На основании этой модели для каждой пары gNB и UE формируется канал связи с учетом теплового шума. После определения всех параметров модели, заданные местоположения UE и gNB визуализируются на графике (рис. 1).

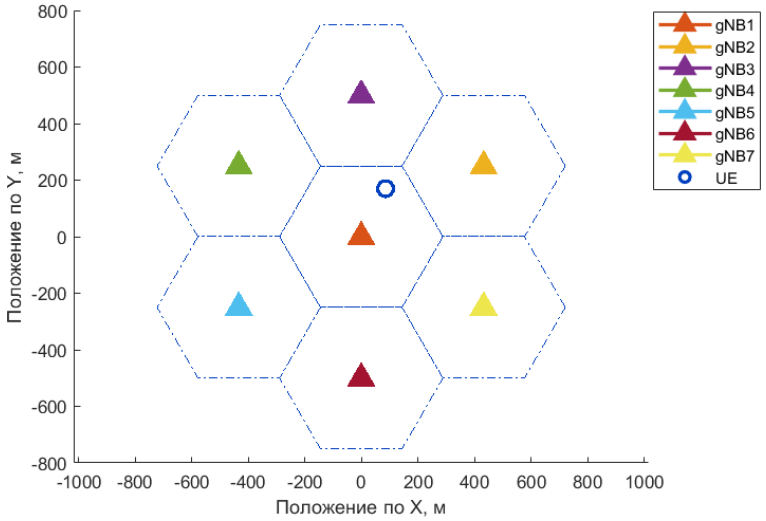


Рис. 1. Заданные местоположения UE и gNB

В данной модели положение UE задается в трех измерениях, однако алгоритм оценки положения вычисляет его в двумерном пространстве, принимая расчетную высоту равной 0 метрам.

2. Формирование сигнала

При формировании сигнала генерируются ресурсные элементы сигнала PRS и канала PDSCH для всех gNB. Для повышения различимости сигналов PRS ресурсные элементы PDSCH передаются в тех слотах, в которых ни одна из gNB не передает PRS. В данной модели ресурсные элементы PRS и PDSCH генерируются с единичной мощностью (0 дБ). После формирования ресурсной сетки выполняется OFDM модуляция для перевода сигнала от всех gNB во временную область.

3. Оценка времени прибытия сигналов

Для оценки TOA указывается количество gNB, которые будут обнаружены в процессе мультилатерации. В модели не рассматривается передача первичного и вторичного сигналов синхронизации (PSS – Primary Synchronization Signal и SSS – Secondary Synchronization Signal, соответственно) в целях поиска gNB. Вместо этого UE выполняет корреляцию принимаемого сигнала с эталонным сигналом PRS, сгенерированным для каждого gNB, после чего на основе результатов корреляции выбираются лучшие gNB. Корреляции по сигналам PRS для всех gNB отображаются на графике (рис. 2). Затем вычисляются значения TOA сигналов от каждой gNB. Для оценки местоположения UE вычисляются значения RSTD на основе абсолютных значений TOA, соответствующих gNB с наилучшими корреляциями.

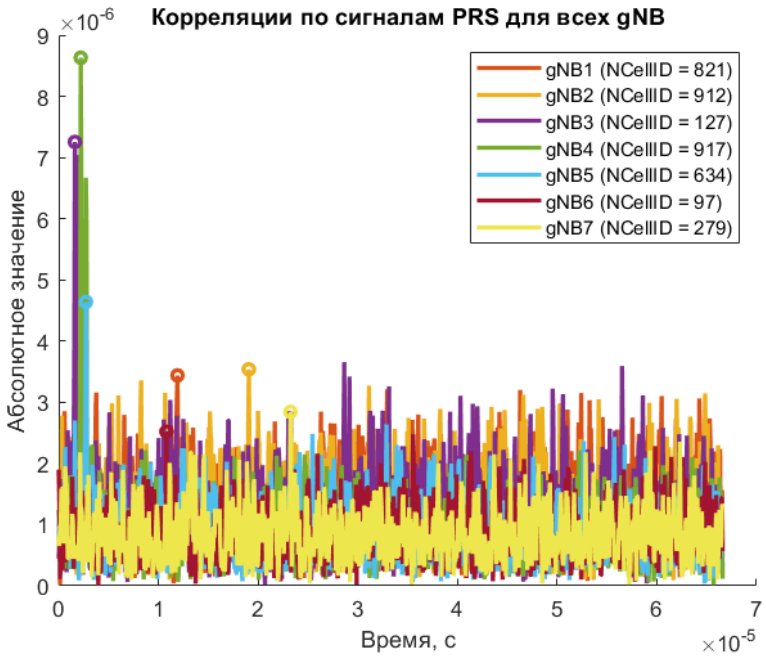


Рис. 2. Корреляции по сигналам PRS для всех gNB

4. Оценка местоположения UE методом OTDOA

Для оценки местоположения UE методом OTDOA рассчитываются значения RSTD (или TDOA) для всех пар gNB, используя оцененные значения TOA. Каждое значение RSTD, соответствующее паре gNB, может быть результатом расположения UE в любой точке гиперболы, фокусы которой расположены в данных gNB. Для оценки местоположения UE учитываются значения RSTD, соответствующие обнаруженным gNB. В данной модели

первая обнаруженная gNB принимается в качестве опорной, а остальные рассматриваются как соседние. Далее вычисляется система уравнений гипербол, используя значения RSTD, соответствующие парам опорной gNB и соседних gNB. Далее выполняется оценка местоположения UE по рассчитанным гиперболам. В общем случае, две гиперболы могут пересекаться не более чем в двух точках. При наличии двух точек пересечения алгоритм, используемый в данной модели, возвращает среднее значение этих двух точек пересечения для оценки местоположения UE. Вычисленное местоположение UE и ошибка определения местоположения выводятся в командное окно MATLAB (рис. 3).

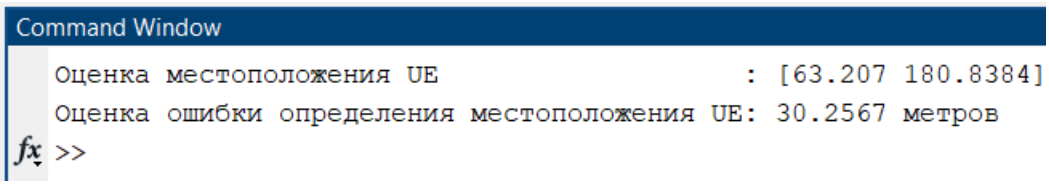


Рис. 3. Вычисленное местоположение UE и ошибка определения местоположения

Затем выполняется построение графиков уравнений гипербол, где точка пересечения этих кривых соответствует местоположению UE (рис. 4).

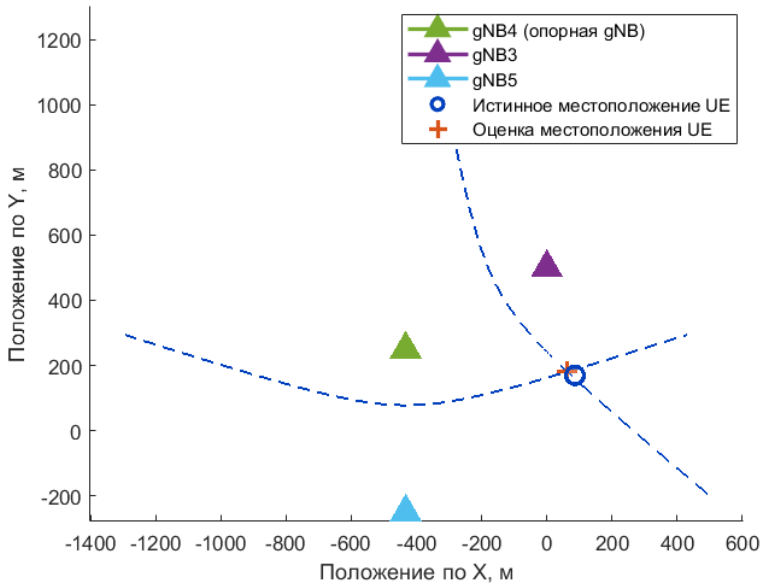


Рис. 4. Оценка местоположения UE на основе гипербол

Заключение

В работе представлена модель оценки местоположения UE на плоскости, основанная на методе OTDOA. Модель позволяет исследовать влияние различных параметров на точность позиционирования, включая изменение

количества и расположения gNB. Также обеспечивается возможность настройки параметров сигналов PRS и конфигурации физического канала PDSCH для каждой станции с последующей оценкой их воздействия на результат. Проведенное тестирование показало, что точность оценки местоположения UE возрастает при увеличении полосы сигналов PRS и нахождении UE в центральной области сети, ограниченной участвующими в позиционировании gNB.

Список используемых источников

1. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS. Труды учебных заведений связи. 2022;8(2):48-63.

2. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS. Труды учебных заведений связи. 2022;8(3):80-99.

3. 3GPP TS 38.215. “NR; Physical layer measurements (Release 16).” 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.

4. 3GPP TR 38.901. “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz.” 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.

POSITIONING IN 5G NR USING PRS

Ryutin K., Fokin G.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents a model for estimating the location of a user equipment in fifth-generation networks using the Observed Time Difference of Arrival method. The method is based on processing Positioning Reference Signals simultaneously transmitted by synchronized base stations. The results of the work demonstrate that the accuracy of position estimation depends significantly on the bandwidth of the positioning reference signals and on the location of the user equipment relative to the base stations.

Key words: 5G NR, PRS, OTDOA, positioning, location

УДК 621.396.677
ГРНТИ 47.45.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ СКАНИРОВНИЯ ЛУЧЕЙ В СЕТЯХ 5G NR

Д. С. Рябиков, В. В. Стариков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Технология формирования луча является ключевым механизмом в сетях 5G NR (New Radio), обеспечивающим эффективную передачу сигналов в миллиметровом диапазоне волн (mmWave). В данной работе рассматривается моделирование процесса сканирования луча (Beam sweeping) для набора сигналов синхронизации SSB (Synchronization Signal Blocks) в системах мобильной связи пятого поколения (5G NR). Была проведена генерация SSB набора с заданными параметрами и расчет весовых коэффициентов для построения антенной решетки. В результате моделирования получены диаграммы направленности антенной решетки для каждого SSB-луча в наборе, демонстрирующие последовательное сканирование пространственного сектора. Визуализация подтверждает корректное формирование лучей с различным разнесением по азимуту и высоте, обеспечивающими полное покрытие зоны обслуживания базовой станции.

5G NR, SSB, MIMO, Beam sweeping, gNB, UE, TRP.

Управление лучом в 5G NR

Поддержка частот миллиметрового диапазона волн требует наличия направленных каналов связи, что привело к определению процедур управления лучом для первоначального доступа в 5G NR. Управление лучом – это набор процедур первого уровня (физического) и второго уровня (контроль доступа к среде) для получения и поддержания набора парных каналов связи (луч, используемый в gNB, в паре с лучом, используемым в UE). Процедуры управления лучом применяются как для передачи и приема по нисходящей, так и для восходящей линии связи. Эти процедуры [1] включают в себя:

– сканирование луча (Beam sweeping);
– измерение луча (Beam measurement);
– определение луча (Beam determination);
– создание отчетов о луче (Beam reporting);
– восстановление луча (Beam recovery).

В данном моделировании основное внимание уделяется процедурам первоначального доступа для неактивных пользователей при установлении

соединения между UE и gNB. На физическом уровне, с использованием блоков сигналов синхронизации SSB, передаваемых в виде пакета в направлении нисходящего канала (от gNB к UE), освещаются как сканирование луча точек передачи и приема TRP (Transmission Reception Points), так и сканирование луча UE для установления соединения парой лучей [2]. Среди процедур управления несколькими лучами [3] определяет это двустороннее сканирование как процедуру P-1.

После установления соединения та же самая связь с парой лучей может использоваться для последующих передач. При необходимости лучи дополнительно уточняются с помощью опорных сигналов с информацией о состоянии канала CSI-RS (Channel State Information Reference Signal) для нисходящего канала и опорных зондирующих сигналов SRS (Sounding Reference Signal) для восходящего канала. В случае сбоя луча эти связи парой лучей могут быть восстановлены; на рис. 1 показаны основные этапы обработки.

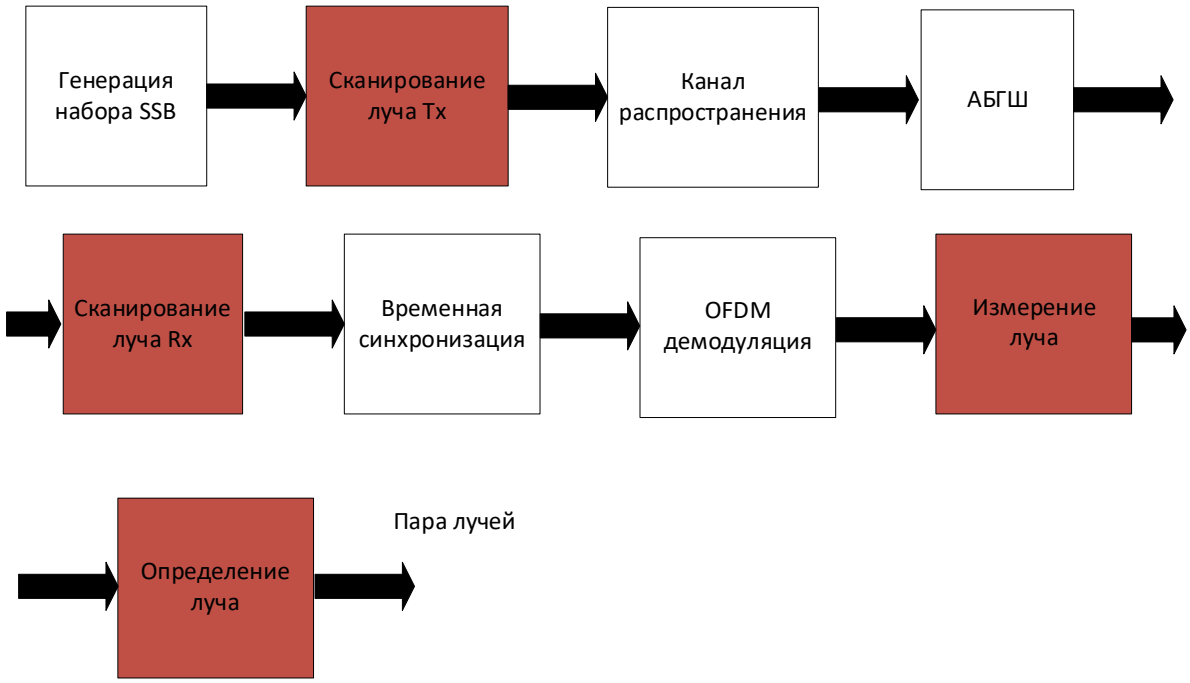


Рис. 1. Основные этапы обработки лучей

Настройки сценария

В сценарии генерируется набор SSB NR, формируется луч для каждого из SSB в наборе для развертки по азимуту, передается этот сигнал со сформированным лучом по каналу MIMO (Multiple Input and Multiple Output) с замиранием и обрабатывается этот принятый сигнал по нескольким лучам на приемной стороне. В сценарии измеряется мощность принятого опорного

сигнала RSRP (Reference Signal Received Power) для каждой из пар лучей передачи-приема и определяется пара лучей с максимальным RSRP. Таким образом, определяется лучшая пара лучей на стороне передачи и приема для моделируемого пространственного сценария.

В сценарии используется канал с замиранием MIMO, который имеет компоненты без прямой видимости NLOS (Non Line Of Sign), что может затруднить визуализацию. Чтобы увидеть, указывают ли выбранные лучи передачи и приема друг на друга на графике канала MIMO, его следует задать как канал с прямой видимостью LOS (Line Of Sign).

Антенная решетка передатчика определена как прямоугольная решетка конфигурации 4 на 8 с перекрестной поляризацией, как определено в [4]. В сценарии рассматривается базовая станция, покрывающая первый из трех секторов соты, как определено в [5]. Установлены пределы развертки антенны по азимуту, чтобы охватить весь сектор 120 градусов, учитывая, что антенная решетка направлена в центр сектора. Получившаяся характеристика направленности антенной решетки представлена на рис. 2.

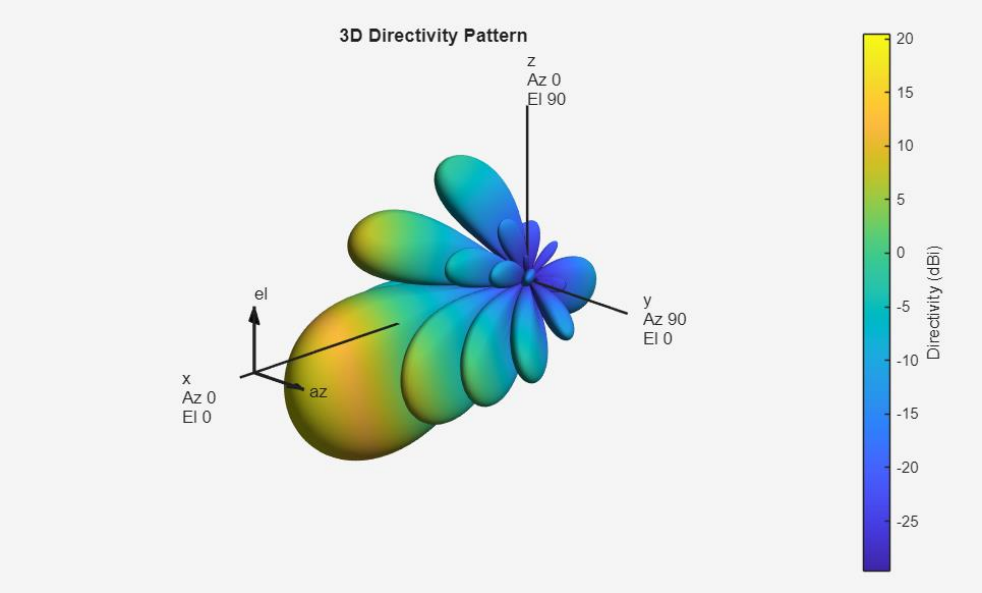


Рис. 2. Характеристика направленности антенной решетки на передачу

Приемная антенная решетка определена как прямоугольную решетка конфигурации 1 на 4 со всенаправленными элементами с перекрестной поляризацией, как определено в [4]. Установлены пределы развертки антенны по азимуту, чтобы охватить половину всего пространства в 360 градусов, учитывая, что элементы антенны являются всенаправленными. Получившаяся характеристика направленности антенной решетки представлена на рис. 3.

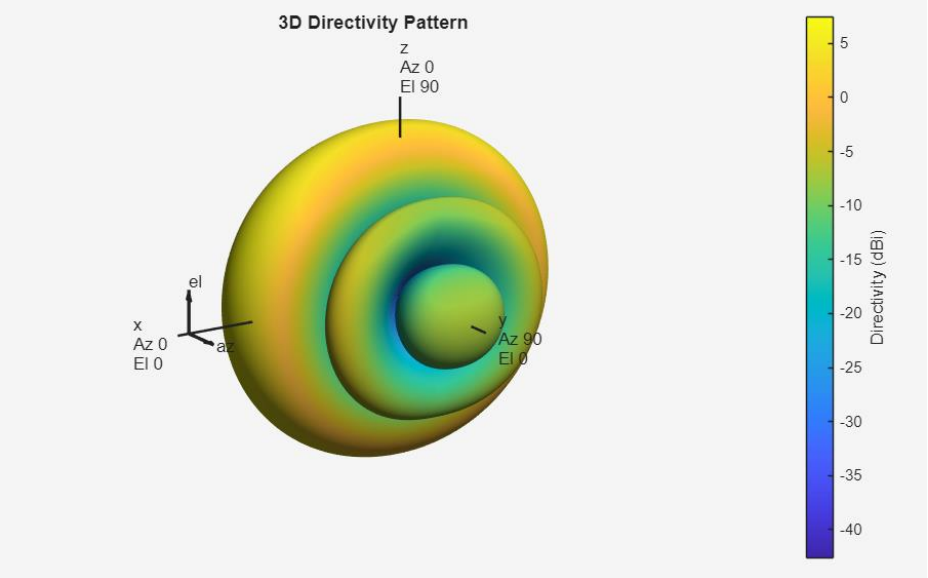


Рис. 3. Характеристика направленности антенной решетки на прием

Канал с замиранием MIMO, настроен согласно [5]. Для достижения TRP-сканирования луча, луч сформирован для каждого из SSB в сгенерированном наборе с помощью аналогового формирования луча. На основе количества SSB в наборе и указанных диапазонов сканирования определяется направление азимута и угла возвышения для различных лучей. Затем формируется луч для отдельных блоков в наборе в каждом из этих направлений.

Для развертки луча на принимающей стороне передаваемый сигнал с формированием луча принимается последовательно по каждому принимающему лучу. Для N передающих лучей и M принимающих лучей в процедуре P-1 каждый из N лучей передается M раз от gNB, так что каждый передающий луч принимается по M принимающим лучам. Для упрощения в сценарии генерируется только один импульс, но для имитации приема импульса по воздуху M раз приемник обрабатывает этот единственный импульс M раз.

Результат моделирования сценария [5] на прием и передачу и формируемыми лучами представлен на рис. 4, результат с выбранными после выравнивания лучами на рис. 5. В случае сильных кластеров NLOS в MIMO канале пара лучей, которая максимизирует значение RSRP, может быть слегка смещена друг относительно друга. Различная высота между базовой станцией и UE также может повлиять на визуализацию. По умолчанию в сценарии показаны все лучи.

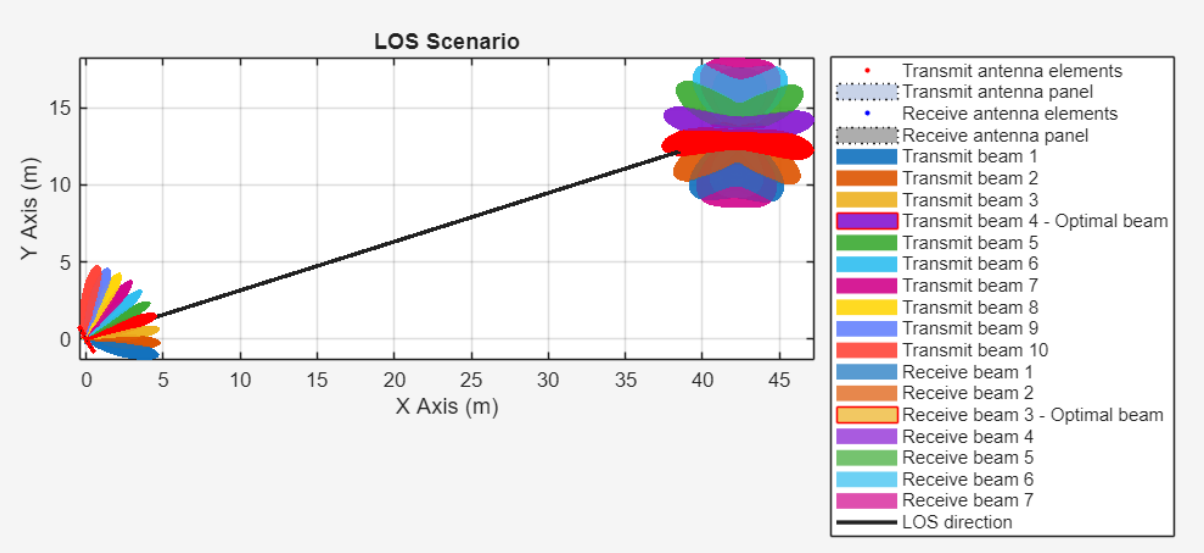


Рис. 4. Все определенные лучи на прием и передачу

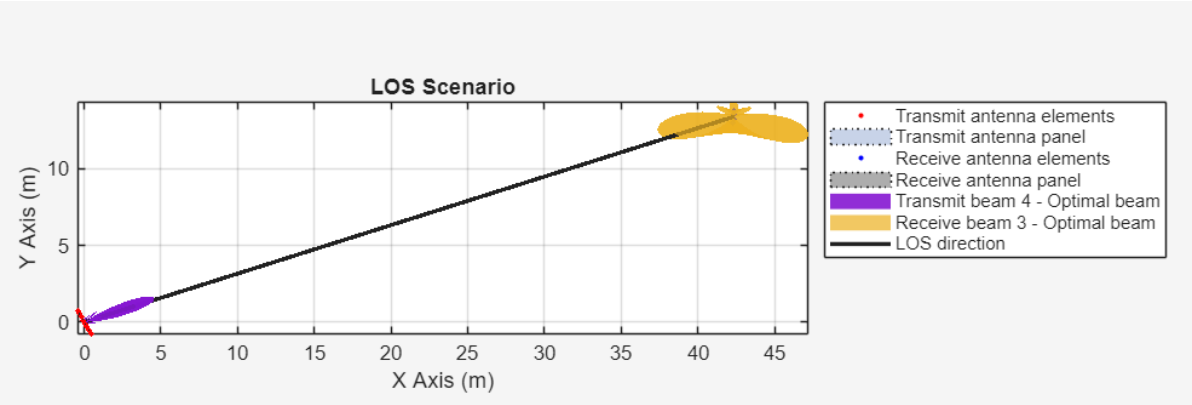


Рис. 5. Оптимальные определенные лучи на прием и передачу

В данном моделировании была показана процедура управления лучами P-1 с использованием SSB для развертки лучей на стороне передачи и приема. Измерив мощность принимаемого опорного сигнала для SSB, можно определить лучшую пару лучей для выбранной пространственной среды.

В сценарии допускаются изменения частотного диапазона, территориального сценария, схемы блоков SSB, количества SSB, размерности антенных решеток передачи и приема, диапазонов развертки передачи и приема, а также режима измерения. Также можно экспериментировать с различными значениями сценария, чтобы увидеть влияние параметров на определение луча.

Список используемых источников

1. Фокин Г. А. Модели управления лучом в сетях 5G NR Часть 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // Первая миля. 2022. № 1. С. 42-49.

2. Фокин Г. А. Модели управления лучом в сетях 5G NR Часть 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая миля. 2022. № 1. С. 62-68.

3. 3GPP TR 38.802. Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects. Release description. Version 14.0.0.

4. 3GPP TR 38.843. Study on Artificial Intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR air interface. Release description. Version 19.0.0.

5. 3GPP TR 38.901. Study on channel model of frequency from 0.5 to 100 GHz. Version 19.0.0.

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедры БТС СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Г. А. Фокиным.

MODELING OF THE BEAM SCANNING PROCEDURE IN 5G NR NETWORSK

Ryabikov D., Starikov V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Beamforming technology is a key mechanism in 5G NR (New Radio) networks, ensuring efficient transmission of signals in the millimeter wave (mmWave) range. This paper discusses the simulation of the beam sweeping process for a burst of synchronization signals (SSBs) in fifth-generation (5G NR) mobile communication systems. An SSB burst with specified parameters was generated, and weighting coefficients were calculated for the construction of an antenna array. The simulation resulted in antenna array directional patterns for each SSB beam in the burst, demonstrating sequential scanning of the spatial sector. The visualization confirms the correct formation of beams with different azimuth and elevation separations, ensuring complete coverage of the base station's service area.

Key words: 5G NR, SSB, MIMO, Beam sweeping, gNB, UE, TRP

УДК 621.396.946
ГРНТИ 89.29.02

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

А. М. Синильников

НИЦ Телеком им. М. И. Кривошеева филиал в г. Санкт-Петербурге

Благодаря технологическим успехам спутниковые системы связи занимают все более значимое место в современных инфокоммуникациях. Предлагается обзор современных подходов к построению спутниковых систем связи и современных технологий радиосвязи, используемых в этих системах. Рассмотрены особенности и тенденции использования орбитальных группировок с учетом возможностей обработки и маршрутизации сигналов на борту спутников связи, а также интеграции спутниковых и наземных систем связи включая сети 5G/6G.

спутниковая связь, интеграция с 5G, неназемные сети, орбитальные группировки, обработка сигналов на борту

Спутниковая связь (СС) представляет собой сгусток научно-технических, экономических и социально-политических проблем. Подходы к построению систем СС меняются в соответствии с изменением социально-экономических запросов общества и научно-технических достижений. Проведем анализ тенденций развития систем СС в целом и их основных составных частей.

1. Системы СС

Развитие спутниковой связи (СС) в 60-90 годы прошлого века определялось решением социально-политических задач на уровне государств. Такими задачами являлось распределение сигналов телевизионного и звукового вещания, дальняя междугородняя телефонная и документальная связь. Для решения указанных задач государства готовы были нести огромные финансовые затраты. В конце прошлого века начинается, а сейчас бурно развивается процесс «цифровизации» связи, как наземной, так и спутниковой. Характерная особенность СС 21 века – создание цифровых сетей СС, взаимодействующих с наземными сетями. В идеале, спутниковая и наземная сети должны быть объединены в единую сеть связи. Так при стандартизации сетей 5G появился термин NTN – сети, не относящиеся к наземным.

В проекте 3GPP определены три основных направления использования систем NTN 5G [1]:

– существенное повышение надежности сервисов 5G за счет гарантирования непрерывности обслуживания в случаях, когда ее невозможно обеспечить одной наземной сетью или комбинацией наземных сетей;
– гарантированная повсеместность сервисов 5G в необслуживаемых (например, пустыня, океаны, лес и т.п.) или недообслуживаемых зонах (например, городских зонах), где нет наземной сети или она экономически неэффективна;
– масштабируемость сервиса 5G за счет использования СС в режиме трансляции контента на очень больших территориях.

В рамках исследований сетей связи 6G рассматривается концепция SAGSIN – интегрированной сети космос-воздух-земля-море [2].

Цифровизация СС существенно расширила спектр предоставляемых услуг связи и повысила востребованность СС. В 90-х годах 20 века начинают разворачивать спутниковые системы низкоскоростной персональной связи Iridium и Globalstar, а также системы низкоскоростной передачи данных типа Orbcomm. В начале 21 века для высокоскоростных спутниковых систем передачи данных консорциум DVB разрабатывает спецификации DVB-RCS/RCS2 на основе которых выпускается оборудование и строятся спутниковые интернет-сети VSAT.

Для негосударственных компаний появились перспективы получения прибыли не только от производства оборудования систем СС, но и от предоставления услуг связи с использованием частных (коммерческих) спутников связи. Более того, частными компаниями, такими как SpaceX и Rocket Lab производится вывод спутников связи на орбиты.

Коммерциализация СС сформировала тенденцию миниатюризации спутников и их компонентов. Появились так-называемые куб-саты – микро и нано-спутники. Размещение на одном ракетоносителе сразу нескольких десятков миниспутников и одновременный вывод их в космическое пространство позволяет существенно снизить затраты на создание спутниковой группировки.

Возможности куб-сатов весьма ограничены из-за их малых размеров и низкой стоимости, но для них найдено такое применение, как спутниковый интернет вещей. В настоящее время десятки частных компаний создают демонстрационные образцы и конкурируют за получение инвестиций на создание экономически привлекательных спутниковых систем IoT.

2. Орбитальные группировки

Для СС традиционно используются геостационарные орбиты (ГСО). В последнее время проявился большой интерес к использованию средних и низких круговых орбит (СКО, НКО), а также высоких эллиптических орбит (ВЭО). Размещение спутников связи на низких орбитах позволяет строить СС обладающие существенно большей пропускной способностью, существенно меньшей задержкой передаваемых данных и при этом использовать антенны с существенно меньшей апертурой по сравнению с системами на ГСО, однако, использование низкоорбитальных группировок осложняется следующими причинами:

– малый срок активного существования спутников на низких орбитах из-за возмущений их движению и как следствие, необходимость регулярного обновления группировки раз в несколько лет.
– необходимость постоянно располагать большим количеством активных спутников в группировке для обеспечения непрерывной связи даже в пределах небольшого района на поверхности Земли из-за малых размеров зоны обслуживания одного спутника и малого интервала времени нахождения спутника в рабочей зоне углов видимости наземными терминалами.
– необходимость располагать обширной распределенной по всей поверхности Земли инфраструктурой, состоящей из тысяч шлюзовых станций и станций управления спутниками, а также космодромами для непрерывного запуска спутников, заводами по производству спутников и наземного оборудования.

С экономической точки зрения НКО эффективны только при необходимости покрытия больших территорий с примерно равномерной плотностью распределения потенциальных абонентов на этих территориях. Экономические проблемы создания спутниковой группировки во многом снимаются использованием ВЭО. Так, например, охват всей территории России и арктического региона обеспечивает группировка из 4-х спутников Экспресс-РВ на ВЭО [3].

3. Бортовая аппаратура

Возможности бортовой аппаратуры спутников связи традиционно являлись ограничивающим фактором для развития СС. Это обусловлено следующими факторами: ограничения на массогабаритные характеристики оборудования и его устойчивость к жестким механическим воздействиям

при выводе на орбиту; необходимость длительного непрерывного функционирования бортовой аппаратуры в необслуживаемом режиме в условиях воздействующих факторов космического пространства; ограничения по энергопотреблению из-за ограниченных возможностей бортовых систем энергоснабжения и терморегулирования в основном связанных с требованиями к их массогабаритным характеристикам.

Основные тенденции в построении бортовой аппаратуры, удовлетворяющей перечисленным выше требованиям: построение радио-трактов работающих в миллиметровом и оптическом диапазонах радиоволн; многолучевые антенные системы на основе фазированных антенных решеток (ФАР); межспутниковая связь в оптическом диапазоне волн; цифровая обработка радиосигналов на борту на основе технологий SDR.

Следует особо отметить, что без бортовых ФАР и высокоскоростной межспутниковой связи эффективность СС на низкоорбитальных группировках чрезвычайно низкая [4].

Бортовые системы обработки сигналов с использованием технологий SDR позволяют применять такие технологии связи, как гибкая маршрутизация/образование каналов, формирование лучей и регенерация сигналов. Применение в бортовой аппаратуре технологий SDR позволяет восстанавливать функционирование аппаратуры, нарушенное в результате воздействия космической среды. Такое восстановление можно осуществлять посредством частичного или полного обновления встроенного программного обеспечения (ПО) SDR модулей. Загрузка обновленного ПО осуществляется из наземного центра управления СС по каналу телеуправления спутником, причем такое обновление ПО может осуществляться в течение всего жизненного цикла спутника.

4. Радиоинтерфейс

Особенность СС по сравнению с наземной связью состоит в чрезвычайно низкой энергетике принимаемых сигналов, существенно зависящей от географического местоположения абонента, погодных условий и других факторов. Данное обстоятельство приводит к необходимости использования сигнально-кодовых конструкций (СКК), обладающих не только высокой помехоустойчивостью, но и способностью адаптироваться к изменяющимся условиям приема.

Для систем СС, использующих ГСО, консорциум DVB предложил целое семейство весьма эффективных СКК (DVB-S2x), методы адаптивного кодирования и методы многостанционного доступа (DVB-RCS2) широко

используемые в современных сетях СС. Использование данных методов в системах СС на низкоорбитальных группировках осложняется быстро меняющимися задержками распространения сигнала, особенно при увеличении зоны обслуживания.

В гибридных спутниково-наземных NTN сетях выбор СКК и методов многостанционного доступа дополнительно осложняется требованиями эффективного взаимодействия, как с наземными терминалами, так и с бортовым спутниковым оборудованием [5]. Необходимы исследования новых сигналов и методов их приема, а также исследования новых методов многостанционного доступа. Перспективными представляются неортогональные методы множественного доступа (NOMA), например, с разделением сигналов по мощности [6].

5. Управление ресурсами СС

Современное наземное и спутниковое оборудование СС располагает большим количеством опций по управлению режимами и конкретными параметрами его работы. Эффективное использование современных сетей СС невозможно без развития систем управления ресурсами. Основные тенденции управления ресурсами сетей:

– управление режимом адаптивного кодирования и модуляции с целью максимизировать спектральную эффективность подстраиваясь под текущие условия распространения радиоволн и требования к качеству обслуживания абонентов;
– оптимальное перераспределение в бортовой аппаратуре мощности лучей исходя из текущих требований наземной сети по объему трафика в каждом луче и качеству обслуживания;
– назначение несущих и ширины полосы;
– коммутация лучей (Beamhopping) с целью повторного назначения частот благодаря использованию пассивных лучей в качестве защитного интервала для внутриканальной помехи;
– агрегирование несущих в разных спектральных полосах, как смежных, так и несмежных для сверх-широкополосного трафика.

Заключение

Проведенный анализ выявил глобальную тенденцию развития СС – создание широкомасштабных сетей СС интегрированных с наземными сетями связи. Основной тенденцией развития космического сегмента СС является построение спутниковых группировок на не геостационарных орбитах, ис-

пользующих оптические межспутниковые линии связи, многолучевые фазированные антенные решетки и программируемое с земли цифровое оборудование обработки радиосигналов. Основной тенденцией развития наземного сегмента СС является создание оборудования шлюзовых станций и абонентских терминалов поддерживающего принципиально новые СКК, методы многостанционного доступа и методы управления ресурсами СС.

Список используемых источников

1. Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on using Satellite Access in 5G; (Release 16), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.822, 06-2018, version 16.0.0.

2. Дунайцев Р. А., Бородин А. С., Кучерявый А. Е. Интегрированная сеть космос-воздух-земля-море как основа сетей связи шестого поколения// Электросвязь. 2022. N 10. С. 5–8.

3. Жаринов В. Ф., Пономарев О. Г., Бобков И. В. Особенности реализации спутниковой системы связи на высокоэллиптической орбите «Экспресс-РВ» // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 2. С. 224–238. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-224-238.

4. Zhu, Q. Laser Inter-Satellite Link Visibility and Topology Optimization for Mega Constellation / Q. Zhu, H. Tao, Y. Cao, X. Li // Electronics. – 2022. – Vol. 11, Issue 14. – 2232. – https://doi.org/10.3390/ electronics11142232.

5. X. Liu, T. Xu, and I. Darwazeh, Coexistence of orthogonal and non orthogonal multicarrier signals in beyond 5G scenarios, in Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). IEEE, 2020, pp. 1–5.

6. Синильников А. М., Фокин Г. А., Гришин И. В., Калинкина А. А. Анализ технологии неортогонального множественного доступа с разделением по мощности PD-NOMA // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 4. С. 3–21.

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF SATELLITE COMMUNICATIONS

Sinilnikov A.
M. I. Krivosheev Research Center for Telecom, St. Petersburg branch

Thanks to technological advances, satellite communication systems (SCC) are becoming increasingly important in modern information communications. This article provides an overview of modern approaches to SCC construction and the radio communication technologies used in these systems. It examines the characteristics and trends of orbital configurations, taking into account the signal processing and routing capabilities onboard communications satellites, as well as the integration of SCC and terrestrial communication systems, including 5G/6G networks.

Key words: satellite communications, 5G integration, non-terrestrial networks, orbital constellations, on-board signal processing

УДК 621.396
ГРНТИ 49.43.00

ВЫБОР СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ПЛАНИРОВАНИЮ СЕТЕЙ 5G И 6G

В. В. Стариков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена выбору среды моделирования для организации цикла лабораторных работ по планированию сотовых сетей мобильной связи пятого и шестого поколений. Рассмотрены функциональные возможности программных комплексов Matlab и Sionna для реализации методов трассировки лучей. Проведен сравнительный экспресс-анализ этих систем по требованиям к аппаратному и программному обеспечению. Предложена концепция разделения лабораторного курса на модули, эффективно использующие преимущества каждой среды моделирования.

планирование сетей мобильной связи, трассировка лучей, SBR, 5G NR, Matlab, Sionna

Задача подготовки инженерных кадров в области планирования и оптимизации сотовых сетей мобильной радиосвязи неразрывно связана с проблематикой выбора среды моделирования [1]. Такие системы предназначены для проведения расчетов радиопокрытия на основе эмпирических, статистических и детерминированных методов. Следует отметить, что активное освоение миллиметрового диапазона частот для сетей 5G и 6G обуславливает необходимость применения методов трассировки лучей, основанных на принципах геометрической оптики (ГО) и относящихся к классу детерминированных [2]. Обозначенный факт накладывает ограничение при выборе среды моделирования, поскольку лишь часть представленных на рынке систем поддерживают вычисления на основе методов трассировки лучей [3]. Вместе с тем большинству программных комплексов свойственны такие недостатки, как высокая стоимость и закрытость программной реализации. Стоит подчеркнуть, что доступ к программному коду метода необходим с целью его верификации, валидации и дальнейшей модификации.

Таким образом, при решении задач оценки радиопокрытия сотовых систем мобильной связи широкое распространение получили две среды моделирования – Matlab и Sionna [4, 5]. Обе системы предоставляют своим поль-

зователям широкие возможности как по настройке готовых моделей расчета, так и по апробации авторских методов расчета.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа систем Matlab и Sionna, в результате которого будет предложена концепция разделения лабораторного курса по планированию сетей 5G и 6G на три учебных модуля.

Сравнительный анализ сред моделирования целесообразно начинать с рассмотрения перечня поддерживаемых методов трассировки лучей, а также с изучения процесса работы с цифровыми моделями местности (ЦММ). На сегодняшний день Matlab и Sionna позволяют производить расчеты по IM (Image Method – метод отражений), SBR (Shooting and Bouncing Rays – метод «стреляющих» и отражающихся лучей) и гибридному (Image + SBR) методам. Подготовка ЦММ к проведению расчетов в среде Matlab включает в себя: загрузку карты формата OSM (Open Street Map – открытая уличная карта), установку приемо-передающего оборудования, присвоение электрофизических свойств поверхностям и триангуляцию местности [6, 7]. Sionna, в отличие от Matlab, не имеет встроенных механизмов для импорта и обработки геометрии среды [8]. Вследствие этого подготовка ЦММ для этой среды осуществляется с помощью Blender – открытого программного обеспечения для создания трехмерной компьютерной графики [9]. На рис. 1. Представлен интерфейс Blender на примере работы с картой OSM.

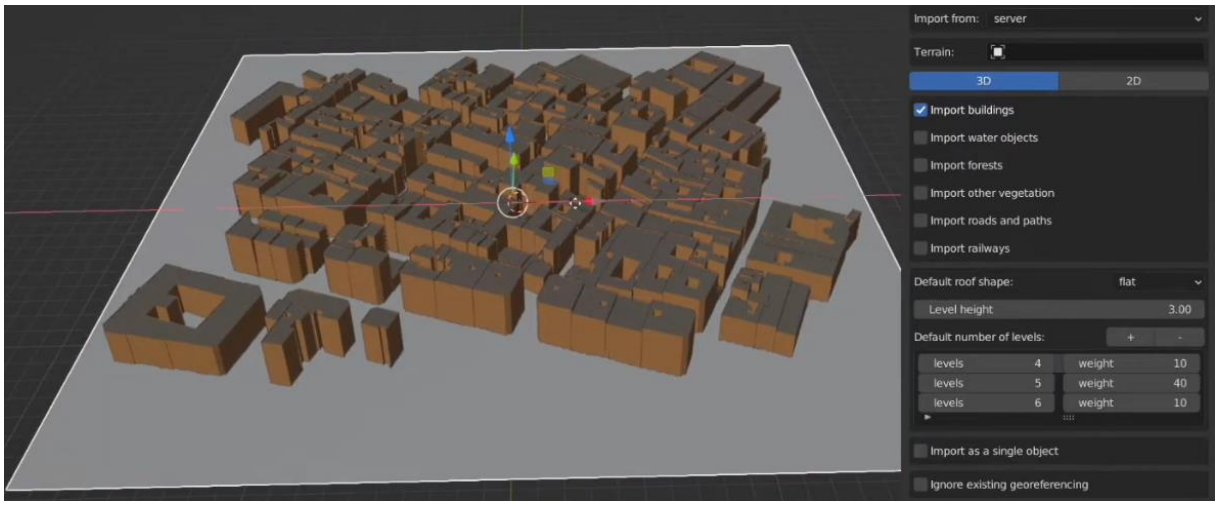


Рис. 1. Интерфейс Blender

Нельзя обойти вниманием возможности систем в части моделирования динамических сцен. Расчет таких сценариев позволяет существенно расширить спектр решаемых задач при оценке радиоканала для высокоскорост-

ных абонентов в условиях плотной городской застройки. Среда Sionna поддерживает 2 варианта учета динамических сцен [8]:

1. Псевдо-динамический. Заключается в программном пошаговом изменении свойств *position* и *orientation* объектов (например, автомобилей) с последующим перезапуском трассировки лучей.

2. Динамический. Реализован с помощью вектора скорости *velocity* для каждого подвижного объекта. Sionna автоматически рассчитывает результирующий доплеровский сдвиг для всех многолучевых компонент без необходимости полного пересчета всех путей. Пример моделирования динамической сцены в среде Sionna представлен на рис. 2.

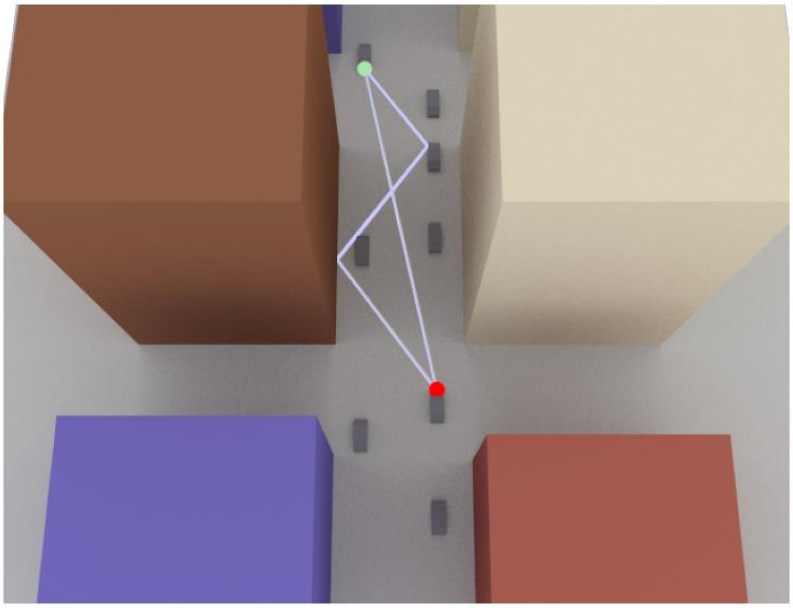


Рис. 2. Моделирование динамической сцены в среде Sionna

В среде Matlab возможность трассировки лучей для динамических сцен не заявлена [7]. Однако псевдо-динамический подход реализуем посредством дискретного изменения положения объектов с последующим перерасчетом всей сцены.

Визуализация результатов расчета в системе Matlab включает в себя найденные пути распространения сигнала и ряд дополнительных параметров: количество претерпеваемых лучом отражений и дифракций, уровень сигнала в точке приема, изменение фазы, длина пути, а также углы «отправки» и «прихода» луча. На рис. 3. представлен результат трассировки лучей по методу SBR в среде Matlab.

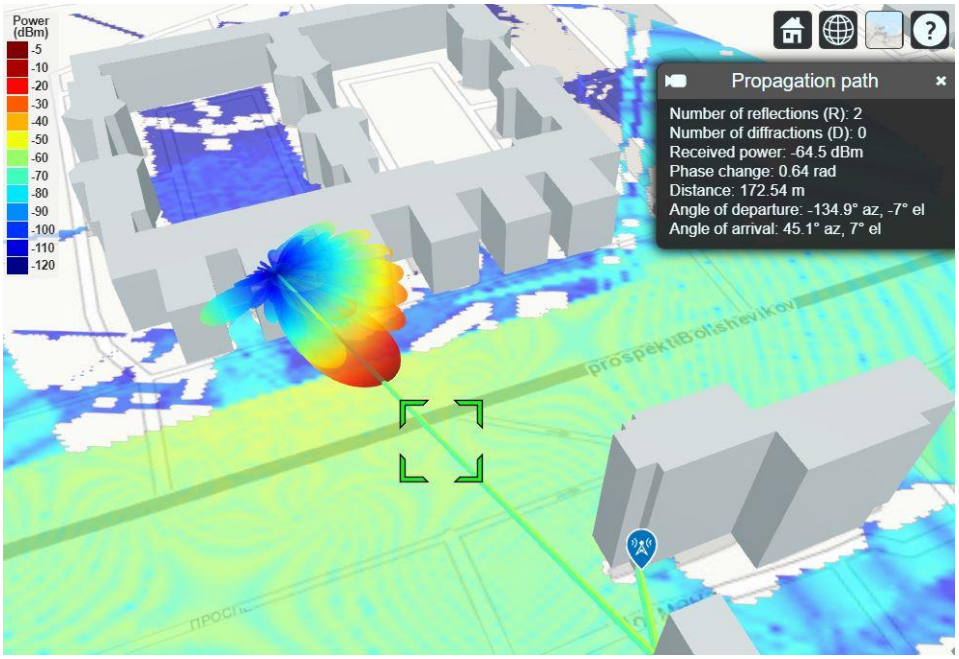


Рис. 3. Результат моделирования в среде Matlab

Отдельного внимания заслуживает учет технологии RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces – реконфигурируемые интеллектуальные поверхности) при описании среды многолучевого распространения. Благодаря своим своему устройству такие элементы позволяют управлять амплитудой, фазой и направлением отраженного от них сигнала [5, 10]. В настоящее время поддержка данной технологии анонсирована только для системы Sionna [8].

Результат детального сравнения возможностей систем Matlab и Sionna по 13 пунктам для сценариев с трассировкой лучей представлен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение функционала систем Matlab и Sionna

№ п/п	Параметр	Matlab	Sionna
1	Поддержка метода image	да	да
2	Поддержка метода SBR	да	да
3	Поддержка гибридного метода	да	да
4	Выбор материалов	да	да
5	Расчет динамических сцен	нет	да
6	Учет дифракции	да	да
7	Учет рассеяния	нет	да
8	Учет преломления	да	да

№ п/п	Параметр	Matlab	Sionna
9	Поддержка GPU ускорения	да (с версии R2025a)	да
10	Расчет indoor сценариев	да	да
11	Учет реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (RIS)	нет	(анонсирован)
12	Создание пользовательских моделей ФАР	да	да
13	Поддержка карт OSM	да	опосредованно через Blender

На основе проведенного сравнительного анализа систем Matlab и Sionna можно сделать вывод о соответствии предоставляемых технологических решений современным методам в области планирования сетей мобильной связи миллиметрового диапазона. Исходя из вышесказанного предлагается следующая концепция лабораторного курса по планированию сетей 5G и 6G. Первый раздел содержит цикл работ по подготовке ЦММ в Blender, целью которых является получение практических навыков редактирования и подготовки детализированных 3D-сцен приема для последующего их применения в среде моделирования. Вторая часть курса посвящена изучению влияния электрофизических свойств поверхности различных материалов на распространение сигнала, а также исследованию учета эффектов дифракции и рассеяния. Третий модуль включает в себя работы по моделированию динамических сцен.

Список используемых источников

1. Фокин Г. А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5g с диаграммообразованием // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 5. С. 4-21.

2. Стариков. В. В., Фокин Г. А. Трассировка лучей в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений. Часть 1. Анализ состояния проблемы // Первая миля. 2025. № 8(132). С. 38–45.

3. Yun Z., Iskander M .F. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications // IEEE Access. 2015. Vol. 3. PP. 1089–1100.

4. Стариков В. В. Инструменты оценки радиопокрытия и трассировки лучей на цифровой модели местности в среде Matlab при использовании направленных антенн // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2025. № 1 (80). С. 148–151.

5. Kilcioglu E., Oestges C. Ray-Tracing Based Algorithms for Indoor RIS Optimization and Coverage Enhancement // 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Stockholm, Sweden. 2025. PP. 1–5.

6. OpenStreetMap. URL: https://www.openstreetmap.org (дата обращения: 15.02.2026).

7. Urban Link and Coverage Analysis Using Ray Tracing. URL: https://nl.mathworks.com/help/comm/ug/urban-channel-link-analysis-and-visualization-using-ray-tracing.html (дата обращения: 15.02.2026).

8. Sionna: An Open-Sourse Library for 6G URL: https://developer.nvidia.com/sionna (дата обращения: 15.02.2025).

9. Blender. URL: https://www.blender.org/ (дата обращения: 15.02.2026).

10. Huang C., Mo R., Yuen C. Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Multiuser MISO Systems Exploiting Deep Reinforcement Learning // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2020. Vol. 38. No 8. PP. 1839–1850.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры БТС СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Г. А. Фокиным.

SELECTING A SIMULATION ENVIRONMENT FOR A 5G AND 6G NETWORK PLANNING LAB

Starikov V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the selection of a modeling environment for a laboratory course on planning fifth- and sixth-generation mobile networks. The capabilities of the Matlab and Sionna software packages for implementing ray tracing methods are discussed. A comparative analysis of these systems' hardware and software requirements is conducted. A concept for dividing the laboratory course into modules that effectively utilize the advantages of each modeling environment is proposed.

Key words: mobile network planning, ray tracing, SBR, 5G NR, Matlab, Sionna

УДК 621.396.94
ГРНТИ 49.43.31

АНАЛИЗ БЮДЖЕТА КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЛОЖЕНИЯ SATELLITE LINK BUDGET ANALYZER

В. В. Стариков, А. О. Тишков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье рассматривается приложение Satellite Link Budget Analyzer, входящее в состав пакета Satellite Communication Toolbox среды MATLAB. Приводится обзор архитектуры и возможностей инструмента, предназначенного для анализа бюджета канала спутниковой связи. Особое внимание уделено методу расчета основных параметров, а также использования пользовательского сценария спутниковой связи. Рассмотрены функции приложения такие как: конфигурация параметров спутникового и наземного оборудования, вычисление характеристик спутникового канала, построение графических результатов.

спутниковая связь, бюджет канала спутниковой связи, link budget, MATLAB, Satellite Communication Toolbox

Анализ бюджета канала связи является одной из ключевых задач при проектировании и использовании спутниковых систем связи. Он позволяет определить, обеспечивается ли требуемое качество передачи информации при заданных параметрах передающей и приемной антенны, а также с учетом условий распространения радиоволн.

Основная задача бюджета канала – достоверность передачи должна удовлетворять заданным требованиям. Бюджет канала отслеживает усиление и ослабление передаваемого сигнала от начала его формирования в передатчике до полного получения в приемнике [1]. При этом использование подвижных спутников и динамических сценариев связи значительно усложняют подобные расчеты. В связи с этим востребованными становятся средства, упрощающие процесс анализа.

Одним из таких средств является приложение Satellite Link Budget Analyzer. Данный инструмент направлен на исследовательские задачи и позволяет выполнять как статический, так и временной анализ бюджета спутниковых каналов связи.

Приложение Satellite Link Budget Analyzer представляет собой графическую среду для анализа бюджета спутниковых линий связи. Основное назначение приложения заключается в автоматизированном расчете параметров канала и их визуализации [2].

На рис. 1 изображен интерфейс приложения Satellite Link Budget Analyzer.

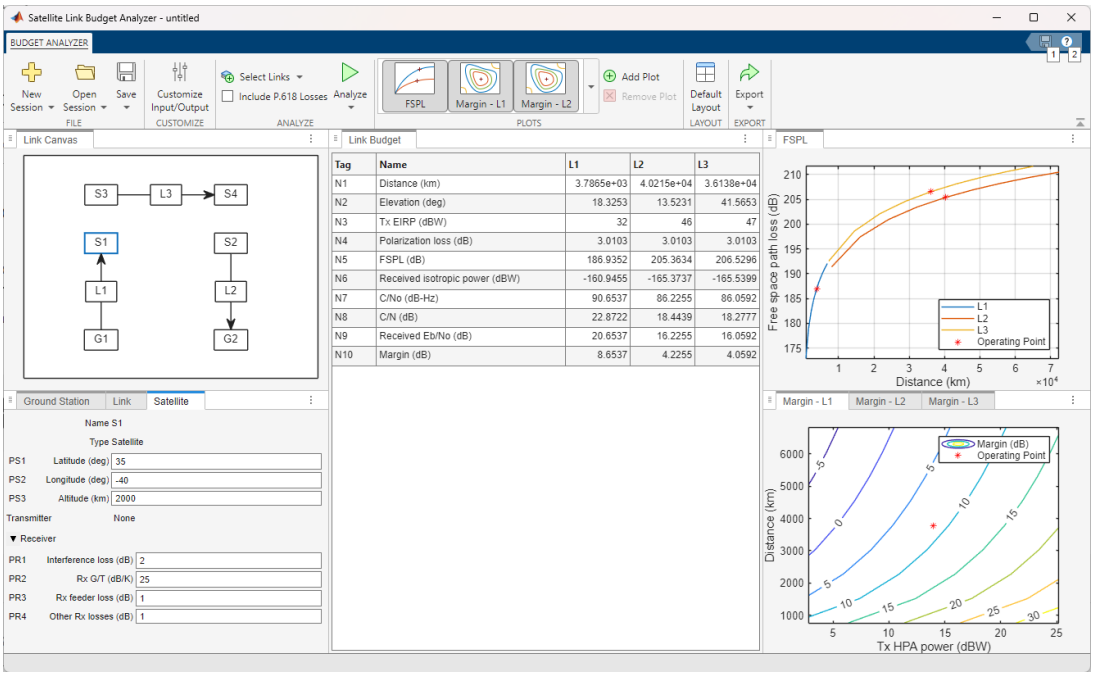


Рис. 1. Интерфейс приложения Satellite Link Budget Analyzer

Архитектура приложения включает следующие основные компоненты:

– рабочую область для визуального формирования структуры канала связи;
– панели настройки параметров передатчиков, приемников;
– модуль расчета бюджета.

Приложение поддерживает два режима анализа [3]:

– статический анализ, при котором параметры системы считаются постоянными;
– анализ с учетом временных сценариев, в котором параметры канала изменяются во времени.

В режиме статического анализа пользователь формирует модель спутникового канала путем добавления в рабочую область элементов передающей и приемной сторон. К таким элементам относятся наземная станция, спутник и канал связи, соединяющий данные устройства.

Для каждого элемента задаются соответствующие параметры: мощность передатчика, коэффициент усиления антенн, рабочая частота, полоса

пропускания и шумовые характеристики приемника и др. Параметры представлены на рис. 2.

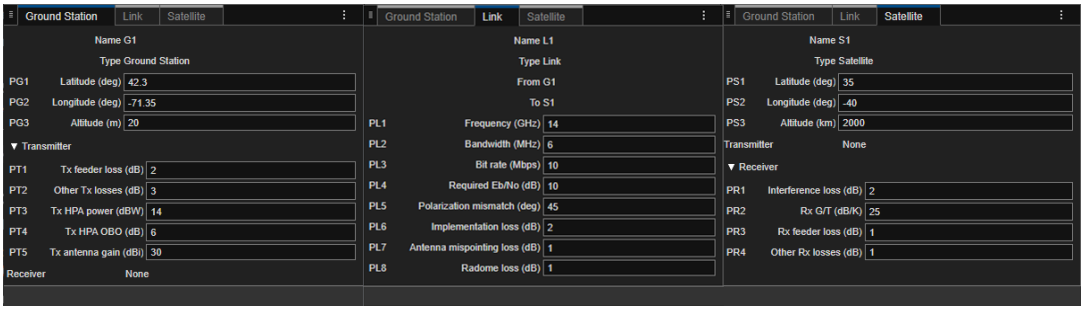


Рис. 2. Параметры, установленные для наземной станции, канала связи, и спутника

После установки параметров приложение автоматически выполняет расчет бюджета. Основными результатами анализа являются:

– эквивалентная изотропно излучаемая мощность (*EIRP*);
– потери в свободном пространстве (*FSPL*);
– потери канала;
– отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума (E_b/N_0);
– энергетический резерв линии связи (Link Margin).

Результаты расчета отображаются в виде таблицы, а также могут быть представлены в виде графиков зависимости параметров от входных величин. Графики изображены на рисунке 3.

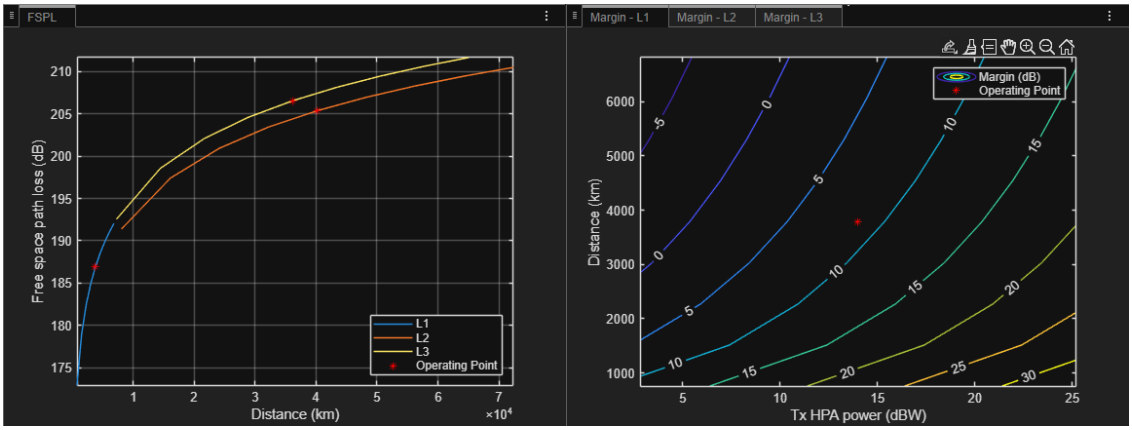


Рис. 3. Графики зависимости параметров от входных величин

Приложение поддерживает анализ каналов спутниковой связи с помощью модели потерь при распространении радиоволн, описанной в рекомендации ITU-R P.618 [4]. На рис. 4 показана конфигурация используемых параметров, в том числе изменения согласно рекомендации ITU-R P.618.

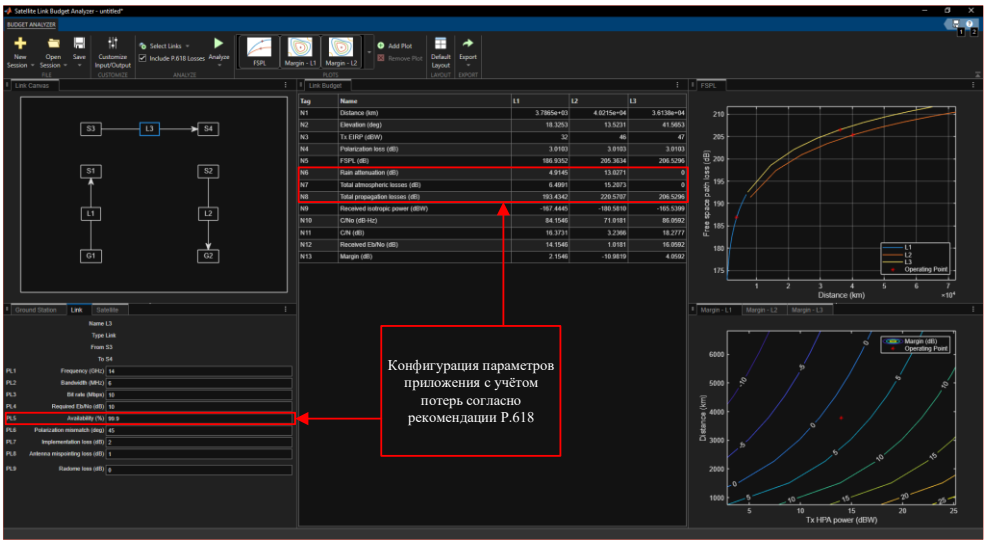


Рис. 4. Конфигурация используемых параметров

Для анализа динамических спутниковых систем приложение Satellite Link Budget Analyzer поддерживает интеграцию с объектами *satelliteScenario*. Такие объекты позволяют моделировать орбитальное движение спутников, изменение расстояния до наземных станций и временную динамику видимости радиоволн.

Пользователь может создать спутниковый сценарий в MATLAB, после чего выгрузить его в приложение [5]. Внедрение осуществляется либо напрямую из MATLAB, либо из файла с расширением – “.mat”.

На рис. 5 показан результат загрузки пользовательского сценария в Satellite Link Budget Analyzer.

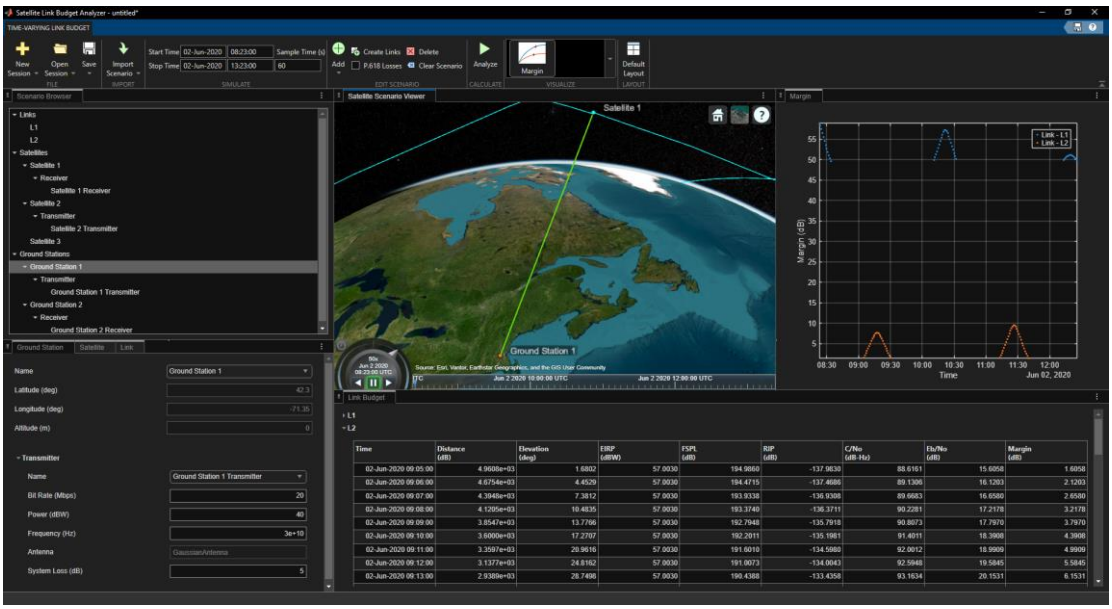


Рис. 5. Загрузка пользовательского спутникового сценария в приложение Satellite Link Budget Analyzer

После загрузки сценарий доступен для редактирования и анализа в графическом интерфейсе приложения. В режиме временного анализа бюджет рассчитывается для каждого момента времени заданного интервала моделирования. Это позволяет учитывать изменение геометрии канала связи, углов места и условий радиовидимости.

Приложение Satellite Link Budget Analyzer Расчет бюджета канала связи рассматривает проектирование и расчет параметров систем связи, гарантируя, что мощность передатчика, коэффициент усиления антенны и чувствительность приемника будут подобраны в соответствии с требованиями для обеспечения надежной связи.

Оценка с учетом всех коэффициентов усиления и потерь бюджета канала связи позволяет количественно оценить производительность системы, помогая инженерам рассчитать достижимую скорость передачи данных, дальность покрытия и качество сигнала.

Бюджет канала связи помогает обеспечить соответствие нормативным требованиям, таким как максимально допустимый уровень мощности передатчика, ограничения по уровню помех и требования к качеству сигнала.

Список используемой литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. 1104 с.

2. Satellite Communications Toolbox. Satellite Link Budget Analyzer. URL: https://www.mathworks.com/help/satcom/ref/satellitelinkbudgetanalyzer-app.html (дата обращения: 07.02.2026)

3. Satellite Communication Toolbox. Get Started with Satellite Link Budget Analyzer App.. URL: https://www.mathworks.com/help/satcom/gs/get-started-with-satellite-link-budget-app.html (дата обращения: 07.02.2026)

4. Международный союз электросвязи. ITU-R рекомендация P.618: Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем космической связи. URL: https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en (дата обращения: 08.02.2026)

5. Satellite Communications Toolbox. Import Custom Scenario into Time-Varying Satellite Link Budget Analyzer.. URL: https://www.mathworks.com/help/satcom/ug/import-custom-scenario-in-satellite-link-budget-analyzer-app.html (дата обращения: 10.02.2026).

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедры БТС СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Г. А. Фокиным.

ANALYSIS OF THE SATELLITE COMMUNICATION LINK BUDGET USING THE APP SATELLITE LINK BUDGET ANALYZER

Starikov V., Tishkov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article discusses the Satellite Link Budget Analyzer application, which is part of the Satellite Communication Toolbox package in the MATLAB environment. An overview of the architecture and capabilities of the tool designed for satellite communication link budget analysis is provided. Special attention is given to the method for calculating the main parameters, as well as the use of a custom satellite communication scenario. The application's functions are considered, such as: configuring parameters for satellite and ground equipment, calculating satellite channel characteristics, and generating graphical results.

Key words: satellite communications, satellite link budget, link budget, MATLAB, Satellite Communication Toolbox

УДК 621.395.44
ГРНТИ 49.03.03

СИНХРОНИЗИРУЕМАЯ ПО РАСПИСАНИЮ СЕТЬ ETHERNET

Н. Л. Сторожук

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В развитии современного производства все большее значение приобретает автоматизация производственных процессов, а для ее обеспечения применяются автоматизированные системы управления технологическими процессами, которые включают множество интеллектуальных датчиков, исполнительных механизмов, средств управления и обработки данных, которым для корректной работы необходима синхронизация времени и своевременная доставка данных с минимальной задержкой. Для решения этих задач могут использоваться такие технологии, как Ethernet с временной синхронизацией и сети, чувствительные ко времени, предназначенные для обеспечения предсказуемости параметров передачи данных в сетях с коммутацией пакетов. В докладе рассматриваются особенности этих технологий и приводится их сравнительный анализ.

TTE, TSN, gPTP, синхронизация времени, технология реального времени.

Введение

Сети связи, строящиеся на принципах коммутации пакетов, получают все большее распространение, включая области промышленной автоматизации, телекоммуникаций и других отраслей экономики, предполагающих высокие требования к качеству предоставляемых услуг. Несмотря на широкое распространение технологии Ethernet, у нее есть ряд недостатков, неприемлемых для критически важных систем реального времени [1].

Традиционные сети Ethernet работают по принципу событийного управления, то есть данные передаются, когда их кто-то отправляет. Они, подобно автомагистралям, справляются со своей задачей, пока не перегружены. Синхронизируемая по расписанию сеть Ethernet больше похожа на железную дорогу, в ней данные передаются по фиксированному расписанию, что обеспечивает предсказуемость времени передачи и гарантированность доставки.

Для передачи данных по расписанию требуется синхронизировать время всех сетевых устройств, и для этого могут быть использованы различные технологии временной синхронизации. В докладе приводится описание

и сравнение наиболее распространенных технологий: Ethernet с временной синхронизацией (TTE, англ. Time Triggered Ethernet) и сети, чувствительные к времени (TSN, англ. Time-Sensitive Networking).

Синхронизации в Ethernet-сети

Современные промышленные технологии выдвигают повышенные требования как к качественным параметрам каналов связи, так и к их пропускной способности. Сложные производственные системы не могут функционировать без гарантированных ультрамалых задержек передачи данных, отсутствия перебоев и разрывов соединений. Широкое использование промышленного интернета вещей (IIoT, англ. Industrial Internet of Things) приводит к тому, что традиционное производство преобразуется в сеть интеллектуальных и взаимосвязанных устройств, это позволяет повысить гибкость, универсальность и эффективность производственных процессов [2].

Эти интеллектуальные производственные системы основаны на использовании сетей связи, соответствующих определенным требованиям, для удовлетворения которых были разработаны различные телекоммуникационные технологии, каждая из которых соответствовала определенному набору задач для конкретных приложений, и совместимы они только на физическом уровне [3].

Ethernet с временной синхронизацией

TTE это пример сети смешанной критичности, которая способна маршрутизировать трафик с разными уровнями синхронизации и требованиями к отказоустойчивости на одном и том же оборудовании. Эта технология была разработана для обеспечения возможностей работы в режиме реального времени и описана в стандарте SAE AS6802.

TTE на этапе инициализации сети синхронизирует локальные часы сетевых компонентов с едиными часами, эта синхронизация продолжается во время работы сети, что обеспечивает восстановление единого времени в случае потери синхронизации между отдельными сетевыми компонентами. Кроме того, алгоритм синхронизации обеспечивает высокую точность передачи единого времени за счет компенсации задержек [4]. Применяемые в TTE алгоритмы устанавливают порядок отправки сообщений для обеспечения синхронизации локальных часов в распределенной системе, используя для этого кадр управления протоколом (PCF, англ. Protocol Control Frame). PCF – это выделенный кадр Ethernet, который переносит информацию управления для синхронизации локальных часов, для этого множество

конечных устройств сети генерируют PCF и распределяют их с помощью коммутаторов.

В сети TTE сообщения PCF, которые используются для передачи управляющих данных, таких как информация о времени, имеют высочайший уровень приоритета, они первыми обрабатываются даже при наличии других типов трафика.

Благодаря распределенному и отказоустойчивому характеру механизма синхронизации TTE несколько устройств действуют как генераторы PCF. Их сообщения принимаются в пунктах назначения с задержками передачи, соответствующими маршрутам пересылки. По этой причине каждое устройство, участвующее в доставке PCF, фиксирует задержку передачи в определенной области PCF перед дальнейшей передачей.

TTE использует распределенный алгоритм синхронизации часов и поддерживает глобальную временную базу путем обмена сообщениями PCF между компонентами синхронизации [5].

Существует три типа ролей синхронизации:

– ведущее устройство синхронизации (SM, англ. Synchronization Master);
– ведомое устройство синхронизации (SC, англ. Synchronization Client);
– ведущее устройство сжатия (CM, англ. Compression Master).

Как правило, исходные устройства назначаются в качестве SM. Один коммутатор рассматривается как CM, а другие коммутаторы и конечные устройства настраиваются как SC.

Порядок отправки PCF имеет большое значение в процессе синхронизации, но вполне вероятно, что PCF будут получены не в том порядке, в котором они были отправлены. Устройства вычисляют параметр, называемый моментом постоянства во времени, для восстановления порядка отправки PCF.

Временная синхронизация TTE осуществляется в два этапа:

– на первом этапе SM отправляют кадры интеграции ведущим CM, которые представляют собой определенный тип PCF;
– на втором этапе CM на основе поступающих PCF-сообщений вычисляет среднее значение относительного времени, формирует и пересылает кадр интеграции с этим значением на SM и SC для установления текущего времени цикла.

Роль каждого устройства выбирается на основе спецификации проектирования сети. Упрощенный процесс синхронизации через TTE показан на рисунке 1 [6].

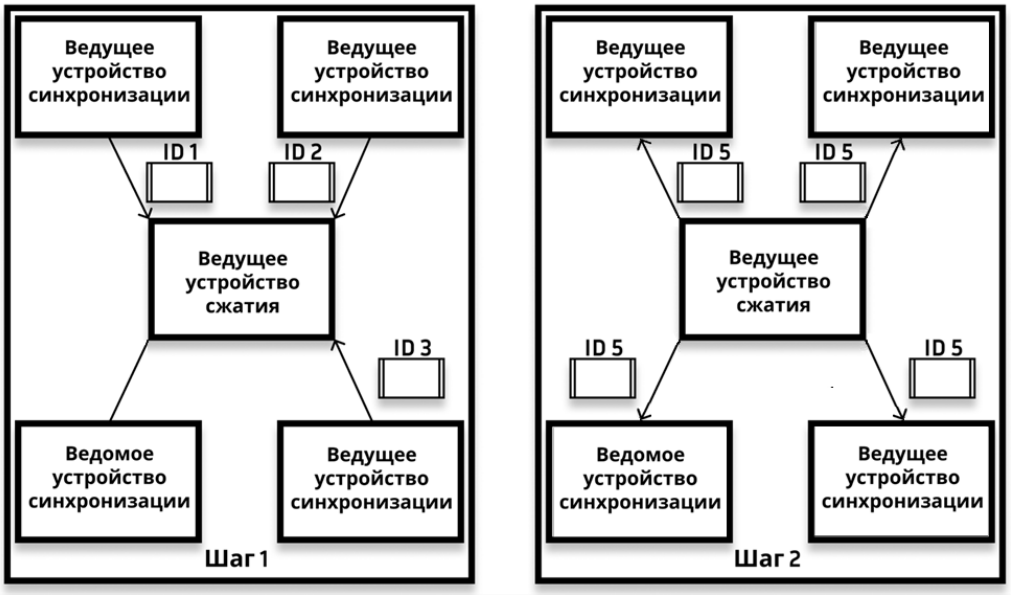


Рис. 1. Упрощенный механизм двухэтапной синхронизации TTE

Для запуска сети TTE SM сначала отправляет сообщение PCF, которое называется кадром холодного старта (CS, англ. Coldstart frame). Затем CM передает полученные CS-кадры в SM, за исключением отправителя CS-кадра. После получения CS-кадра SM сначала ожидает в течение заданного интервала времени, а затем отправляет в CM подтверждающее сообщение. В качестве следующего шага CM транслирует подтверждающее сообщение в другие SM. Этот процесс завершается инициированием процедуры синхронизации из SM при получении подтверждающего сообщения и после фиксированной продолжительности ожидания.

Протокол TTE имеет некоторые недостатки, связанные с устойчивостью к отказам, обеспечением безопасности, пропускной способностью и сложностью реализации:

– CM усредняет полученные от разных SM значения времени и при выходе из строя часов SM или искажении данных при передаче результат синхронизации может быть не верным;
– в протоколе нет механизма обеспечения проверки подлинности данных и предотвращения их искажения;
– протокол не поддерживает приоритезацию трафика и блокирует все сообщения в интервале для сообщений, запускаемых по времени, даже при их отсутствии;
– TTE не подходит для беспроводной коммуникации из-за непредсказуемости задержек передачи на физическом уровне.

Сети, чувствительные ко времени

Для передачи данных различных уровней критичности с гарантированной величиной сквозной задержки и джиттера часто используется технология TSN, описанная в стандарте IEEE 802.1, ключевым аспектом которой является конвергенция синхронного и асинхронного трафика различных уровней критичности в одной сети.

В сетях TSN для обеспечения детерминированного поведения передающего оборудования и оконечных устройств решающее значение имеет временная синхронизация, для которой используется специальный профиль PTP под названием обобщенный протокол точного времени (gPTP, англ. generalized Precision Time Protocol), являющийся по сути профилем протокола точного времени и допускающий синхронизацию времени только через Ethernet.

В системах gPTP есть два компонента для настройки частоты локальных часов в соответствии с настройками основного источника точного времени, гроссмейстерских часов (грандмастера) (GM, англ. Grandmaster).

1. Соотношение частот соседних элементов или коэффициент скорости изменения времени соседа (NRR, англ. Neighbour Rate Ratio) измеряется для каждого порта и определяет отношение тактовой частоты, приходящей на этот порт от соседнего элемента, к собственной тактовой частоте элемента. NRR используется для компенсации разницы частот при реализации метода измерения задержки на линии связи.

2. Совокупное смещение частоты (CSRO, англ. Cumulative Scaled Rate) определяет соотношение частот гроссмейстерских часов и определенных ведомых часов. Значение CSRO используется для коррекции смещения от GM времени часов элемента сети.

Как показано на рисунке 2, CSRO рассчитывается на основе накопления NRR. Механизм измерения CSRO основан на двух основных принципах.

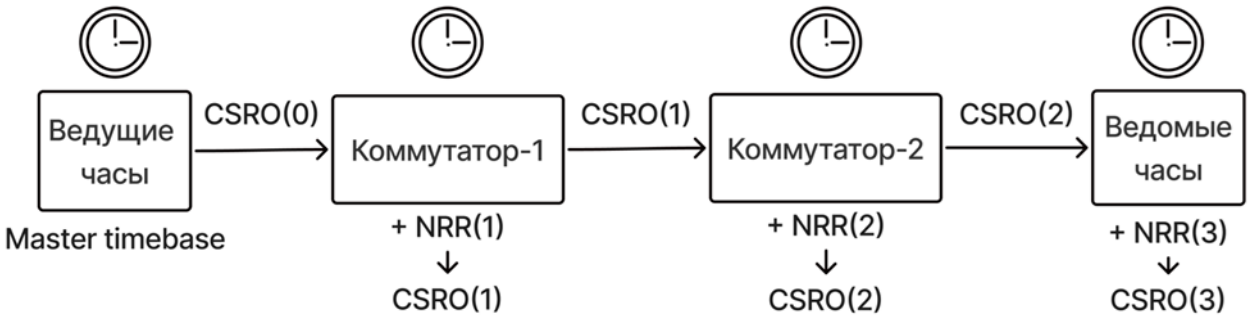


Рис. 2. Процессы реализации обмена сообщениями NRR и CSRO

Значения NRR непрерывно измеряются с помощью метода однорангового измерения задержки. Если в сети происходят какие-либо изменения, нет необходимости повторно вычислять значения NRR. Кроме того, при получении первого сообщения настройки последующих действий элемент с поддержкой шкалы времени получает новый CSRO.

Если элемент сети с поддержкой шкалы времени вносит ошибку в измерение значения смещения часов, то это приводит к неточному измерению времени. Однако ошибка в значении смещения часов не оказывает прямого влияния на смещение часов в последующих элементах.

Для создания дерева синхронизации все элементы в домене gPTP реализуют алгоритм выбора лучших главных часов (BMCA, англ. Best Master Clock Algorithm), описанный в стандарте IEEE 1588, или как он называется в новых редакциях стандартов МСЭ-Т − алгоритм выбора лучших часов передатчика времени (BTCA, англ. Best TimeTransmitter Clock Algorithm).

Технология TSN может полностью раскрыть свой потенциал только тогда, когда, кроме того, что обеспечена синхронизация всех сетевых устройств по времени, все устройства сети одинаковым образом выбирают пути и время отправки сообщений. То есть в сети должно проводиться планирование передачи сообщений и формирование и планирования трафика.

Технология TSN использует два способа формирования трафика: формирование на основе кредитов CBS (англ. Credit-Based Shaper) и асинхронное формирование ATS (англ. Asynchronous Traffic Shaping).

Формирователь CBS резервирует определенную полосу пропускания для каждого высокоприоритетного потока данных, путем назначения условной величины, называемой кредитом. Пока кредит конкретного потока положительный, он передается, а его кредит уменьшается. В то время, когда кредит потока отрицательный, передаются данные с более низким приоритетом.

Формирователь ATS оптимизирует использование пропускной способности канала для передачи сообщений с разным приоритетом и с произвольными периодами поступления. ATS не нуждается в синхронизации времени, он помещает пакеты по мере их поступления в буфер очереди, для каждого потока трафика назначается время, когда его пакеты могут передаваться. Пакет становится доступным для передачи, если назначенное время меньше или равно текущему времени.

Планировщики трафика задают временной интервал передачи для каждого потока данных, что гарантирует приоритет критичным данным по

сравнению с менее важными, в результате чего все данные будут доставлены в заданное время. Чаще других в сетях TSN используется формирование с учетом времени (TAS, англ. Time-Aware Scheduler).

TAS обеспечивает приоритизацию передачи трафика во времени путем деления интервала передачи на отдельные циклы одинаковой длины, что позволяет пересылать критичные ко времени доставки данные, временно прерывая передачу обычного трафика [7]. Выбор следующего кадра для передачи обусловлен состоянием соответствующего временного отрезка и не определяется строго линейной иерархией в очереди.

Планирование и формирование профиля передачи позволяют передавать в одной сети разные классы трафика с разными приоритетами, у каждого из которых свои требования к пропускной способности и сквозной задержке.

Некоторые особенности TSN:

– использование формирователей и планировщиков трафика, с помощью которых организуются циклы передачи, в рамках которых доступ к выходному порту коммутатора предоставляется разным очередям в разные моменты времени;
– синхронизация времени на основе протокола gPTP, где информация передается от центрального источника ко всем локальным ведомым часам;
– механизм бесшовного резервирования, при котором кадры Ethernet передаются по двум независимым маршрутам, при этом принимающий узел обрабатывает первый из полученных кадров, второй кадр отбрасывается [8].

Преимущества TSN:

– высокая гибкость при управлении сетью;
– возможности адаптивного распределения пропускной способности.

Недостатки TSN:

– отсутствие жесткой синхронизации времени;
– необходимость использования специализированных коммутаторов;
– необходимость планирования совместной работы коммутаторов

Сравнение технологий детерминированной передачи данных

TTE поддерживает только синхронный трафик с передачей по расписанию, в то время как TSN поддерживает как синхронный, так и асинхронный трафик.

TSN позволяет передавать несколько разноприоритетных потоков в один временной интервал, что позволяет трафику с низким приоритетом использовать оставшуюся полосу пропускания высокоприоритетного трафика, а TTE не поддерживает приоритезацию и блокирует весь трафик, даже когда нет запланированных кадров для передачи.

Выбор между TTE и TSN зависит от уникальных потребностей отрасли и приложения. Например, TTE подходит для систем со строгими требованиями к синхронизации времени, а TSN – для динамических приложений, требующих гибкости и адаптивного распределения пропускной способности.

Список используемых источников

1. Прошин Ф. А., Сторожук М. Н., Сторожук Н. Л. Методы синхронизации в сетях связи // Первая миля. 2024. № 2 (118). С. 62–69.

2. Сторожук Н. Л. Применение технологии TSN в промышленных сетях связи // Первая миля. 2025. № 2 (126). С. 48–53.

3. Управление сетями связи // OSP.RU. URL: https://www.osp.ru/nets/1999/08-09/144243 (дата обращения: 12.05.2026).

4. Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI), Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID) // IEEE Standards Support. URL: https://standards-support.ieee.org/hc/en-us/articles/4888705676564 (дата обращения: 12.05.2026).

5. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 1 // СТА. 2020. № 1. С. 18–22.

6. Zhao L., He F., Li E. [et al.]. Comparison of Time Sensitive Networking (TSN) and TTEthernet // IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2018. DOI: 10.1109/DASC.2018.8569454

7. Kopetz H. Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. Springer Science & Business Media, 2011. 376 p.

8. Алексеев А. И., Канаев А. К. Сети, чувствительные ко времени, и их использование на железнодорожном транспорте // Сборник докладов научно-технической конференции СПб НТО РЭС имени А. С. Попова. 2023. № 1 (78). С. 202–205.

SCHEDULED ETHERNET NETWORK

Storozhuk N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Production processes automation is becoming increasingly important for the development of modern manufacturing. To meet the demand technological process control systems are used. The systems incorporate a multitude of intelligent sensors, actuators, controls, and data processing tools. Their proper operation requires time synchronization and timely data delivery with minimal latency provided. Technologies such as Time Triggered Ethernet and Time-Sensitive Networking, designed to provide favorable data transmission parameters in switched packet networks, may be implemented to address the challenges. The report examines the characteristics of technologies and a comparative analysis is provided.

Key words: TTE, TSN, gPTP, time synchronization, real-time technology

УДК 621.397.132
ГРНТИ 47.51.39

РАЗРАБОТКА КУРСА ПО ИЗУЧЕНИЮ МНОГОУРОВНЕВЫХ ГЕНЕРАТИВНЫХ ТРАНСФОРМЕРНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РАМКАХ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д. А. Татаренков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье предложена система учебных модулей, последовательно раскрывающих принципы функционирования архитектур трансформерного типа и диффузионных моделей. В рамках проектирования комплекса особое внимание уделено переходу от базового текстового синтеза к сложным техникам управляемой генерации. Описанная структура методических указаний позволяет студентам освоить детерминированный подход к работе с искусственным интеллектом (ИИ), используя интерфейсы визуального программирования. Научная новизна работы заключается в систематизации материалов для обучения генеративному ИИ и создании алгоритмизированного подхода к решению творческих и инженерных задач. Практическая значимость подтверждается возможностью интеграции комплекса в учебные планы подготовки специалистов в области информационных технологий и телевизионного производства.

генеративные нейронные сети, comfyUI

Современное телевизионное производство находится в стадии глубокой технологической трансформации, вызванной внедрением генеративного искусственного интеллекта. Традиционные методы создания декораций, реставрации архивов и стилизации контента дополняются или полностью замещаются нейросетевыми алгоритмами. В связи с этим возникает острая необходимость в подготовке кадров, обладающих техническим пониманием архитектуры трансформеров и диффузионных моделей [1].

Цель представленного курса – сформировать у студентов техническое понимание архитектуры автоэнкодеров и трансформерных сетей для осознанного управления качеством генерации медиаконтента. Ключевым аспектом обучения является понимание перехода от пиксельного представления изображения к семантическому (латентному). В основе курса лежит изучение вариационных автоэнкодеров (VAE), которые обеспечивают эффективное сжатие данных и вычислительную экономию.

Процесс обучения включает разбор функций потерь, которые определяют качество реконструкции:

– регрессионная потеря (MSE/MAE) удерживает общие формы и цвета;
– перцептивная потеря (LPIPS) заставляет модель сохранять детали, значимые для человеческого глаза;
– адверсариальные потери используются в рамках дискриминатора GAN для повышения реалистичности.

Особое внимание уделяется механизму Cross-Attention, который позволяет текстовым подсказкам (промптам) управлять процессом генерации. Математически это выражается через взаимодействие векторов Query (Q), Key (K) и Value (V) [2]:

$$Attention(Q, K, V) = softmax(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}})V.$$

Для освоения материала выбран стек технологий, являющийся отчасти индустриальным стандартом в области машинного обучения:

– Python 3.10+: базовый язык разработки;
– PyTorch: фреймворк глубокого обучения;
– ComfyUI: среда визуального программирования, позволяющая проектировать сложные узловые системы и визуализировать работу VAE (рис. 1).

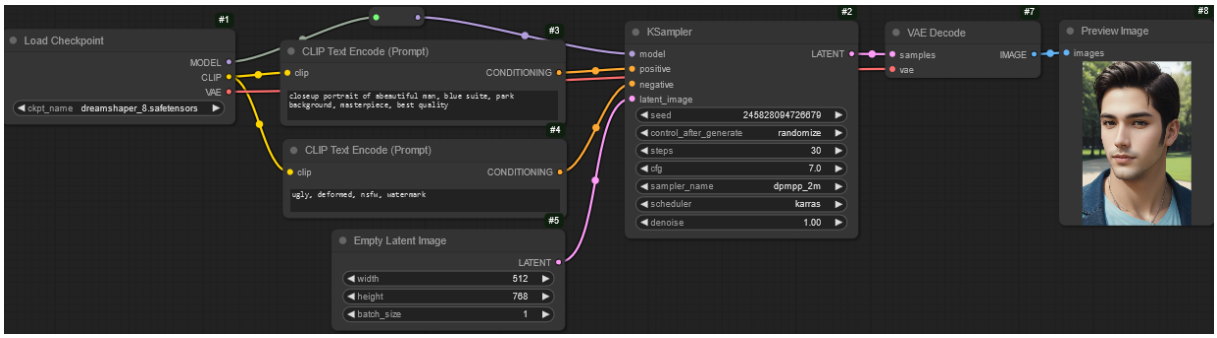


Рис. 1. Пример конфигурации ComfyUI

Практические модули включают изучение библиотек diffusers и transformers от Hugging Face, а также opencv-python для постобработки и предобработки кадров. Студенты осваивают базовый процесс генерации, состоящий из загрузки модели, текстового кодирования через CLIP, работы семплера (KSampler) и финального декодирования.

Для специалистов телевидения критически важна повторяемость результата и точность управления композицией. В курсе подробно рассматриваются следующие технологии LoRA (Low-Rank Adaptation), ControlNet [3],

заполнение пустот, слияние различных моделей, смешивание состояний латентного пространства и др.

LoRA [4] представляет собой эффективный метод дообучения (Fine-tuning) без необходимости изменять веса всей нейросети. Математическая интерпретация метода заключается в добавлении низкоранговых матриц к основным весам W: $W_{new} = W_{old} + \Delta W$, где $\Delta W = A \times B$.

Технология ControlNet позволяет использовать дополнительные условия (карты глубин, наброски, маски) для управления структурой изображения. Это реализуется через создание обучаемой копии (Trainable Copy) основной модели и использование "нулевых сверток" (Zero Convolutions).

В рамках подготовки специалистов решаются следующие задачи:

1. Изучение структуры латентного пространства для глубокого понимания данных.

2. Освоение нодовых систем управления на примере ComfyUI.

3. Применение генеративных моделей для реставрации архивных видеоматериалов, стилизации (рис. 2) и создания виртуальных декораций.

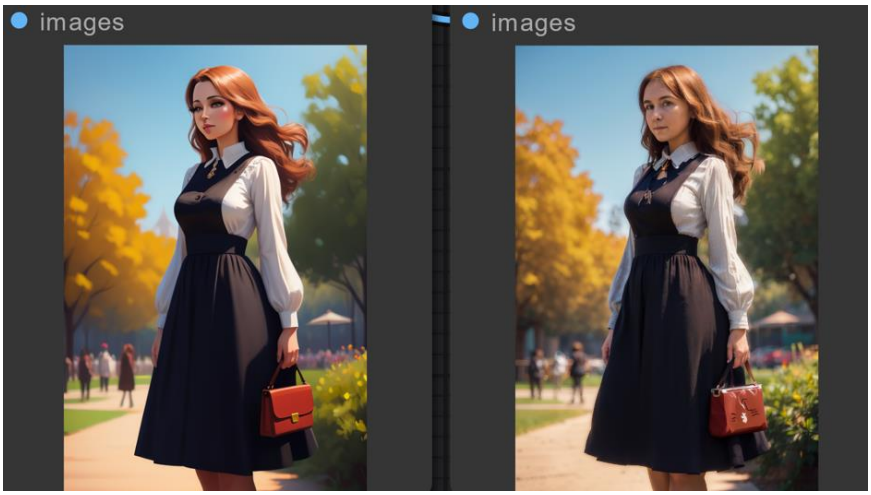


Рис. 1. Пример применения стилизации.

Процесс генерации позиционируется не как «создание картинки из пустоты», а как процесс обратной диффузии – постепенного удаления шума под управлением семантических векторов.

Разработанный курс обеспечивает системный подход к изучению генеративных технологий. Сочетание глубокой теоретической базы (архитектура трансформеров, математика диффузии) с практической работой в нодовых интерфейсах позволяет подготовить специалистов, способных интегрировать ИИ в пайплайны современного телевизионного производства.

Это не только повышает эффективность работы, но и открывает новые горизонты для визуализации задуманного.

Список используемых источников

1. Rombach, R. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models / R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, B. Ommer // 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR): 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2022. P. 10674–10685 DOI:10.1109/CVPR52688.2022.01042.

2. Vaswani, A. Attention Is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, L. Kaiser, I. Polosukhin // arXiv, 2023. DOI:10.48550/arXiv.1706.03762.

3. Zhang, L. Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models/ L. Zhang, A. Rao, M. Agrawala // 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV): 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) // Paris, France: IEEE, 2023. P. 3813–3824. DOI:10.1109/ICCV51070.2023.00355.

4. Hu, E.J. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models / E.J. Hu, Y. Shen, P. Wallis, Z. Allen-Zhu, Y. Li, S. Wang, L. Wang, W. Chen // arXiv, 2021. DOI:10.48550/arXiv.2106.09685.

Статья представлена заведующим кафедры ТВиМ СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом С. Л. Фёдоровым.

DEVELOPMENT OF A COURSE ON MULTILEVEL GENERATIVE TRANSFORMER NEURAL NETWORKS AS PART OF TELEVISION PRODUCTION SPECIALIST TRAINING

Tatarenkov D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article proposes a system of educational modules that sequentially disclose the principles of functioning of transformer-type architectures and diffusion models. As part of the design of the complex, special attention is paid to the transition from basic text synthesis to complex techniques of controlled generation. The described structure of methodological guidelines allows students to master a deterministic approach to working with artificial intelligence (AI) using visual programming interfaces. The scientific novelty of the work consists in the systematization of materials for teaching generative AI and the creation of an algorithmic approach to solving creative and engineering problems. Practical significance is confirmed by the possibility of integrating the complex into the curricula for training specialists in the field of information technology and television production.

Key words: generative neural networks , ComfyUI

УДК 621.397.132
ГРНТИ 47.51.39

СИНТЕЗ ВИРТУАЛЬНЫХ РАКУРСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПЕРЕДНЕПЛАНОВЫХ ОККЛЮЗИЙ

Д. А. Татаренков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рендеринг на основе карт глубины (DIBR) – ключевая технология синтеза ракурсов, однако она страдает от трещин и дыр на границах глубины. В статье предложен подход перепроецирования, сочетающий детекцию разрывов глубины с анализом экранных расстояний для разделения заполняемых поверхностных щелей и истинных переднеплановых окклюзий. Метод строит треугольную сетку из исходных пикселей, разрывает ребра на границах глубины и выявляет треугольники (меши) с большим растяжением в экранном пространстве. Такие области классифицируются как переднеплановые окклюзии и уточняются с помощью анализа локальной согласованности глубины. Двухэтапная классификация позволяет выполнять селективное заполнение пустот, сохраняя границы объектов переднего плана и эффективно заполняя поверхностные разрывы.

карта глубины, виртуальный ракурс, заполнение пустот, DIBR

Одной из задач исследований в области дополненной (AR), смешанной (MR), виртуальной реальности (VR), а также систем телевидения с произвольной точкой просмотра является разработка алгоритмических и аппаратных решений для получения синтезированных в реальном времени ракурсов. Многоракурсная съемка реализуется путем фотографической регистрации множества сопряженных точек трехмерного объекта с различных углов обзора (рис. 1), что приводит к появлению горизонтального параллакса между любыми двумя связанными изображениями.

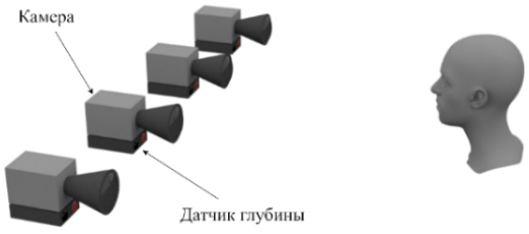


Рис. 1. Получение ракурсов и соответствующих карт глубины

В основе алгоритма рендеринга по глубине изображения (DIBR) лежит перспективное преобразование. Для реализации данного подхода требуется выполнить совмещение проекций в системе мировых координат, что обеспечивает точное воспроизведение геометрии сцены и согласованность синтезированных видов. Такой метод позволяет достичь высокого качества рендеринга при относительно низких вычислительных затратах, что делает его перспективным для применения в интерактивных 3D-системах.

Целью данного исследования является разработка и программная реализация алгоритма синтеза виртуальных ракурсов на основе метода DIBR. Основное внимание уделено минимизации артефактов геометрических искажений и обеспечению реалистичного восстановления областей окклюзии. Традиционные методы часто сталкиваются с проблемой «эффекта резины», когда текстура переднего плана растягивается на задний план из-за неверной интерпретации резких перепадов глубины.



Рис. 2. Маска границ объектов

Процесс формирования изображения включает работу с камерой и датчиком глубин. Первичная подготовка карты глубины требует очистки от ложных пикселей. В сенсорах значение 0 обычно означает отсутствие данных или выход за пределы видимости. Для обработки используется булева маска, проверяется каждый элемент: если глубина больше нуля, пиксель считается валидным, в противном случае – невалидным. Применение такого фильтра исключает «схлопывание» нулевых точек в координаты (0, 0, 0), что предотвращает появление визуального мусора в 3D-пространстве [1].

Для подавления шума при сохранении границ используется управляемый билатеральный фильтр (Joint Bilateral Filter, JBF) [2]. В отличие от линейного размытия по Гауссу, JBF учитывает контент направляющего RGB-изображения. Уравнение для каждого пикселя p в окрестности Ω принимает вид:

$$D_f = \frac{1}{W_p}\sum_{q\in\Omega} D_q \cdot \underbrace{f(\| p-q \|)}_{Пространство} \cdot \underbrace{g(\| I_p - I_q \|)}_{Диапазон},$$

где W_p – нормировочный коэффициент (сумма всех весов):

$$W_p = \sum_{q\in\Omega} f(\| p-q \|) \cdot g(\| I_p - I_q \|).$$

Пространственный компонент f(·) обеспечивает затухание веса с расстоянием:

$$f(\| p-q \|) = exp\left(-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_s^2}\right).$$

Компонент диапазона g(·) вводит нелинейность, основываясь на разности интенсивностей направляющего изображения I:

$$g(\| I_p - I_q \|) = exp\left(-\frac{\|I_p-I_q\|^2}{2\sigma_c^2}\right).$$

Для защиты границ вычисляется маска градиента ∇D, отключающая фильтр на участках с резкими перепадами, что сохраняет четкость силуэтов (рис. 2).

Формирование изображения описывается моделью камеры-обскуры. Точка $P = [X, Y, Z]^T$ в системе координат камеры отображается в пиксельные координаты $p = [u, v, 1]^T$ через матрицу внутренних параметров K, тогда справедливо $s\cdot p = K \cdot P$. Матрица калибровки K включает фокусные расстояния f_x, f_y и координаты оптического центра c_x, c_y. Поскольку проекция необратима (информация о глубине теряется), для реконструкции 3D-структуры используется инверсия матрицы K и данные о дистанции Z:

$$P_{3D} = Z \cdot (K^{-1} \cdot p).$$

Прямой перенос пикселей часто создает «дыры» из-за дискретности сетки. В данной работе изображение интерпретируется как полигональная сетка.

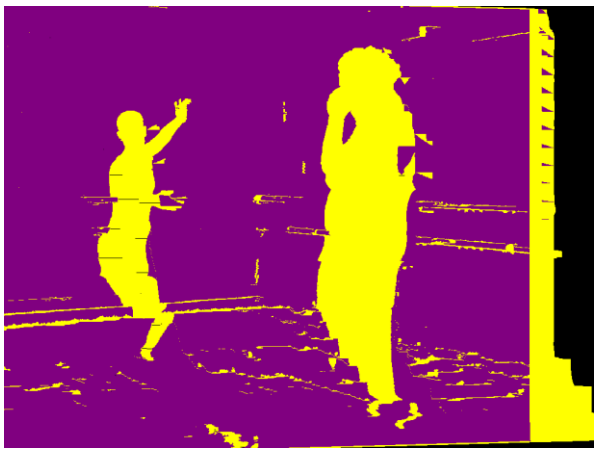


Рис. 3. Заполнение полигональной сеткой

Для каждого квадрата из 4-х соседних пикселей проверяется условие связности (рис. 3). Если разница глубин соседних вершин превышает порог τ:

$$|Z_i - Z_j| > \tau$$

ребро считается разорванным. Это критично для предотвращения растягивания текстуры переднего плана на задний. Связные области отрисовываются как цельные треугольники, заполняя мелкие пустоты, а истинные разрывы оставляют зоны окклюзий для последующего заполнения.

После перепроецирования зоны окклюзий классифицируются на основе гистограммного анализа глубины. Сцена разделяется на передний план (FG) и задний план (BG) по порогу $Z_{пор}$.

Для предотвращения «затекания» цветов переднего плана на фон при заполнении, маска заднего плана расширяется за счет дилатации маски переднего плана:

$$M_{BG} = M_{\text{дыр}} \cup \text{dilate}(M_{FG})$$

Для заполнения пустот применяется Fast Marching Method (метод Телеа) [3]. Алгоритм восстанавливает пиксели вдоль изофот, двигаясь от границ внутрь области окклюзии (рис. 4).



Рис. 4. Результат заполнения

Эффективность метода оценивалась на наборах данных, таких как BALLET, BREAKDANCER, KENDO и других. В качестве метрик использовались PSNR (пиковое отношение сигнала к шуму) и LPIPS (перцептивное сходство) [4].

Средние показатели по всем сценам: PSNR для представленного метода составило 22 дБ, классического метода – 23 дБ. По метрике LPIPS представленный метод имеет среднее значение 0,19, а классический метод – 0,2.

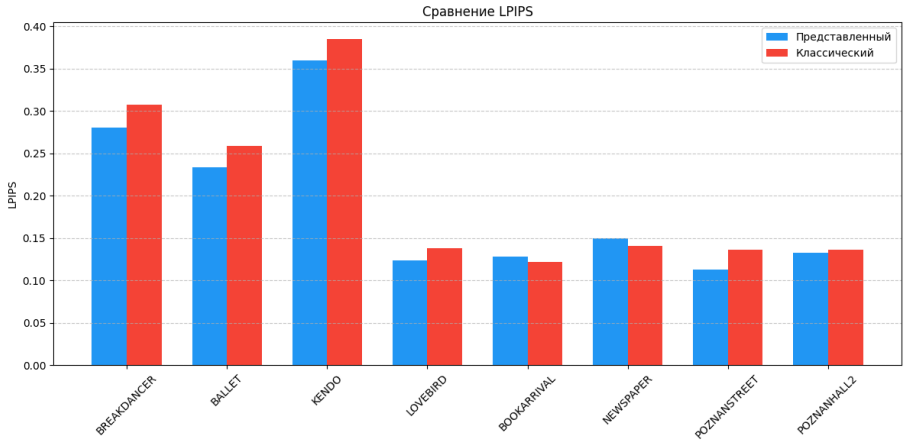


Рис. 5. Метрика LPIPS

На многих сценах представленный метод показывает лучшие результаты по метрике LPIPS (рис. 5), что свидетельствует о более высоком визуальном качестве синтеза, несмотря на незначительное отставание по формальному PSNR на некоторых выборках (рис. 6).

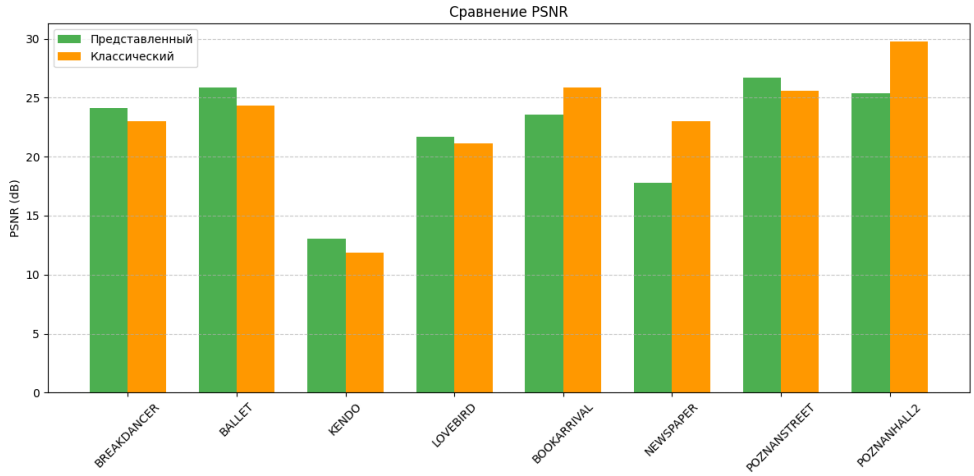


Рис. 6. Метрика PSNR

Разработанный алгоритм успешно решает проблему артефактов на границах объектов за счет интеграции меш-рендеринга и адаптивного разделения слоев. Хотя классические методы могут выигрывать в абсолютных значениях PSNR на определенных сценах (например, POZNANHALL2), предложенный подход обеспечивает более реалистичное восстановление текстур в зонах окклюзий, что подтверждается улучшением показателей перцептивной метрики LPIPS.

Список используемых источников

1. Hartley and Zisserman - 2018 - Multiple view geometry in computer vision.
2. Gupta S., Panigrahi S.K. Joint Bilateral Filter for Signal Recovery from Phase Preserved Curvelet Coefficients for Image Denoising/arXiv:1804.05512 [eess] // arXiv, 2018.
3. Telea A. An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method//Journal of Graphics Tools, 2004, Vol. 9, N 1, P. 23-34.
4. Snell J., Ridgeway K., Liao R., Roads B.D., Mozer M.C., Zemel R.S. Learning to generate images with perceptual similarity metrics//2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017. P. 4277-4281.

Статья представлена заведующим кафедры ТВиМ СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом С. Л. Фёдоровым.

SYNTHESIS OF VIRTUAL VIEWS USING ADAPTIVE DETECTION OF FOREGROUND OCCLUSIONS

Tatarenkov D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Depth-Image-Based Rendering (DIBR) is a key technology for view synthesis; however, it suffers from cracks and holes at depth boundaries. This paper proposes a re-projection approach that combines depth discontinuity detection with screen distance analysis to distinguish between fillable surface gaps and true foreground occlusions.

Key words: depth map, virtual viewpoint, hole filling, DIBR

УДК 004.932
ГРНТИ 28.23.15

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ПОТОКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАННЫХ

А. Н. Тучкевич, С. Л. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются подходы к использованию методов обнаружения объектов в системах потоковой передачи видео, основанных на современных мультимедийных транспортных протоколах. Описываются варианты интеграции модулей обнаружения объектов в цепочку обработки видеоданных на этапах обработки, кодирования, и доставки контента. Рассматриваются способы передачи результатов обнаружения объектов в виде метаданных, их согласование с сегментацией и временной шкалой потока, а также использование этих данных для последующей обработки и формирования событий. Анализируются требования к задержке и пропускной способности, влияющие на частоту анализа и объем метаданных.

обнаружение объектов, компьютерное зрение, нейронные сети, машинное обучение, потоковая передача видео, MPEG-DASH, ROI, граничные вычисления

Внедрение методов обнаружения объектов в системы потоковой передачи видео требует согласования параметров кодирования, режима передачи сегментов и вычислительной цепочки обработки, поскольку они совместно определяют точность распознавания и сквозную задержку [1].

В задачах автоматизированной обработки видео целевые показатели качества включают метрики работы модели, и поэтому конфигурация видеопотока должна выбираться с учетом ограничений по пропускной способности и задержке [2].

Дополнительной технической задачей является передача результатов обнаружения как временных метаданных, согласованных с сегментацией и временной шкалой представления в протоколах типа MPEG-DASH. [3]

Рассматриваемая архитектура включает в себя: источник (камера, кодер), сегментированную передачу по HTTP, вычислительный узел на границе сети, или в облачной инфраструктуре, а также конечных потребителей метаданных и событий.

Внедрение обнаружения объектов возможно на трех разных уровнях:

1. Обработка (цепочка вывода результатов работы модели).

2. Кодирование и адаптация при потоковой передаче.

3. Передача результатов в виде метаданных и событий.

Производительность и задержка зависят не только от выбранной модели обнаружения, но и от реализации многостадийной цепочки обработки (обнаружение, сопровождение, кластеризация, последующий анализ сцен), где узкие места часто возникают на около-модельных уровнях [4]. Для граничных вычислений критичен энергетический бюджет, поэтому применяются методы раннего выхода (early-exit) и троттлинга, позволяющие адаптировать время выполнения к различной сложности кадров [5]. Подход, описанный в [5] сочетает ранний выход с JIT и оптимизацией частот центрального и графического процессоров, что заявлено как способ достигнуть ускорения в 2,8 раз и среднюю экономию энергии, порядка 26 %, при сохранении высокой точности.

Для систем, где вычисления происходят на границе сети, применим асинхронный механизм, при котором быстрый результат граничных вычислений уточняется более точным результатом вычислений в облаке с последующим совмещением [6].

В [1] рассматривается задача конфигурационно-адаптивной передачи для обработки видео в реальном времени и используется обучение с подкреплением для выбора конфигураций на основе измерений зависимости конфигурация от полосы пропускания и точности полученных выводов. Отдельным параметром, требующим оптимизации, является размер пакетов, который влияет одновременно на эффективность передачи и на точность через своевременность адаптации к контенту [2]. Вследствие чего появляется необходимость увязывать частоту анализа кадров (например, анализ каждого N-го кадра) с доступной полосой пропускания и допустимой задержкой, поскольку рост частоты анализа повышает вычислительную нагрузку и объем метаданных.

Отдельный класс методов относится к кодированию с выделением областей интереса [7], где распределение битов смещается в пользу наиболее информативных областей. В контексте обнаружения объектов область интереса может определяться на основе предшествующих кадров, после чего кодирование используется для повышения точности вывода при фиксированной полосе либо для снижения требуемой полосы при фиксированной точности.

Результаты обнаружения объектов (ограничительные рамки, классы, оценки уверенности) должны передаваться как метаданные, согласованные

с временной шкалой представления, чтобы конечный потребитель мог однозначно сопоставить результат и момент воспроизведения [3]. Для протокола MPEG-DASH описаны три механизма передачи таких данных: события в манифесте, внутрипотоковые события и дорожки временных метаданных. В [3] введено разделение режимов выполнения действий приложениями на стороне конечного потребителя: по получению (on-receive) и по времени начала на временной шкале (on-start), что определяет требования к буферизации и планированию обработки.

– в режиме «по получению» приложение получает событие при наступлении времени начала (или уже после, но в течение временного диапазона), что повышает требования к своевременности появления метаданных относительно сегментации и буфера воспроизведения;
– в режиме «по началу» приложение получает данные заранее относительно момента действия и должно хранить состояние события, чтобы активировать его в нужный момент на временной шкале.

Для обеспечения единообразия передаваемых форматов метаданных в сегментированном fMP4, в [8] описан способ упаковки метаданных ID3 в блок сообщений событий (Event Message Box, emsg) с фиксированным идентификатором схемы, где message_data содержит полные данные ID3v2.

Этот способ задает ограничения на согласование времени представления с интервалом фрагмента, что важно для корректной синхронизации обнаружения с сегментами.

За счет сегментации видеопотока публикация метаданных становится усредненной (например, на сегмент или на фрагмент), однако увеличение частоты анализа приводит к росту объема метаданных и нагрузки на передачу и клиентскую обработку [3]. Поэтому требования к задержке и пропускной способности фактически ограничивают допустимую частоту анализа и формат представления метаданных (включая степень агрегации и сжатия структуры обнаружения). Переход от покадровых обнаружений к событиям прикладного уровня требует объединения по времени и устойчивости к вариациям задержек передачи сегментов и времени обработки на вычислительном узле.

Рассмотренные подходы показывают, что внедрение обнаружения объектов в потоковую передачу видео требует согласованного управления конфигурацией кодирования, эффективной организации цепочки вычислений и корректной передачи временных метаданных, синхронизированных с временной шкалой потоковой передачи. Использование кодирования с обла-

стями интереса позволяет эффективнее расходовать битовый бюджет для задач автоматической обработки, а энергоадаптивные методы на границе сети и асинхронные схемы позволяют повышать точность без нарушения требований к задержке.

Список используемых источников

1. Zhang M., Wang F., Liu J., "CASVA: Configuration-Adaptive Streaming for Live Video Analytics", IEEE INFOCOM, 2022.

2. Zhang L., Zhang Y., Wu X., et al. "Batch Adaptative Streaming for Video Analytics", IEEE INFOCOM, 2022.

3. DASH-IF, "DASH events and timed metadata tracks timing and processing model and client reference model", DASH-IF Implementation Guidelines, 2020.

4. Ghafouri S., Ding Y., O'Connel N., et al. "Optimizing video analytics inference pipelines: a case study", BDCAT, 2025.

5. Zhang Z., Zhao Y., Chang M., et al. "E4: Energy-Efficient DNN Inference for Edge Video Analytics Via Early-Exit and DVFS", AAAI, 2025.

6. Ghosh A., Lyengar S., Lee S., et al. "Streaming Video Analytics On The Edge With Asynchronous Cloud Support", IoTDI, 2023.

7. Abati D., Yang Y., Habibian A., et al. "Region-of-Interest Based Neural Video Compression", BMVC, 2022.

8. AOMedia, "Carriage of ID3 Timed Metadata in the Common Media Application Format (CMAF)", AOMedia Specification, 2020.

NEURAL NETWORK MODELS FOR OBJECT DETECTION AND THEIR APPLICATION IN VIDEO CONTENT PROCESSING SYSTEMS

Tuchkevich A., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses approaches to using object detection methods in video streaming systems based on modern multimedia transport protocols. It describes options for integrating object detection modules into the video data processing chain at the stages of processing, encoding, and content delivery. It examines ways to transmit object detection results as metadata, their coordination with segmentation and the stream timeline, as well as the use of this data for subsequent processing and event generation. It analyzes the delay and bandwidth requirements that affect the frequency of analysis and the volume of metadata.

Key words: object detection, computer vision, neural networks, machine learning, video streaming, MPEG-DASH, ROI, edge computing

УДК 621.391
ГРНТИ 49.33.29

ПРАВИЛА ОБМЕНА РЕСУРСАМИ МЕЖДУ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМИ СЕТЯМИ В УСЛОВИЯХ НЕОРДИНАРНЫХ СОБЫТИЙ

А. В. Фёдоров

Филиал НИЦ Телеком в г. Санкт- Петербурге

При возникновении неординарных событий различной природы обычно возникает необходимость передачи части ресурсов сети связи общего пользования в сеть связи специального назначения. Такая операция требует разработки научно обоснованных правил, которые представляют собой компромиссное решение между потребностями сети связи специального назначения и теми возможностями, которыми располагает сеть связи общего пользования. В статье предлагаются рациональные решения возникающих задач для типичных ситуаций, порождаемых неординарными событиями. Они основаны на результатах исследований математической модели, которая адекватно отображает процесс обмена ресурсами между телекоммуникационными сетями в условиях неординарных событий.

сеть связи специального назначения, неординарное событие, ресурсы сети связи.

Введение

При проявлении отрицательных последствий неординарных событий различной природы обычно возникает необходимость передачи части ресурсов сети связи общего пользования (ССОП) в сеть связи специального назначения (СССН) с последующим их возвращением. Такая операция требует разработки научно обоснованных правил, которые представляют собой компромиссное решение между потребностями СССН и теми возможностями, которыми располагает ССОП в данный момент времени.

Для разработки подобных правил можно воспользоваться идеями теории социального обмена [1], преобразовав их в набор операций, которые имеют техническую направленность. Результаты соответствующего преобразования в данной работе рассматриваются как правила обмена телекоммуникационными ресурсами (ОТР).

Теория социального обмена направлена на достижение такого уровня эффекта от взаимодействия людей, который обеспечивает им взаимную выгоду. Такую же цель преследует и ОТР. Предлагаемый подход к разработке

правил ОТР основан на формировании модели рассматриваемого процесса и ее анализе. Предлагаемые правила ОТР будут совершенствоваться за счет использования средств искусственного интеллекта [2] и информации, накапливаемой цифровыми двойниками [3].

Основные положения ОТР

Из совокупности мотиваций, типичных для социального обмена, для ОТР практический интерес представляют два аспекта: групповая выгода и постоянство статуса. Групповая выгода заключается в том, что ССОП быстрее вернется к штатному режиму функционирования, а СССН обеспечит эффективную работу экстренных оперативных служб (ЭОС). Постоянство статуса можно трактовать как поддержку имиджа ССОП и СССН как систем, способных эффективно обслуживать трафик в условиях неординарных событий.

Основным ресурсом, передаваемым из ССОП в СССН, становится пропускная способность транспортной сети. Доступные транспортные ресурсы ССОП к моменту времени t составляют величину $H_A(t)$. Через отрезок времени, равный t_0, для работы ЭОС могут потребоваться ресурсы $H_R(\ t+\ t_0)$. Предварительно вычисленные ресурсы, необходимые для поддержки ключевых услуг ССОП, обозначены как $H_K(t + t_0)$. Следовательно, максимальное значение величины $H_R(t + t_0)$ определяется очевидным соотношением:

$$\max\{H_R(t+t_0)\} \le H_A(t) - H_K(t+t_0). \quad (1)$$

Таким образом, для реализации правил ОТР из ССОП в СССН может быть выделена пропускная способность не более величины $\max\{H_R(t + t_0)\}$, которая оценивается соотношением (1). На самом деле эта величина, как правило, будет меньше. Ниже она обозначена как $H_D(t)$. В течение периода времени, необходимого для завершения работ ЭОС, текущая величина $H_D(t)$ может меняться – и увеличиваться, и уменьшаться. Данный факт иллюстрирует рис. 1. Предполагается, что окончание ликвидации последствий неординарного события приходится на момент времени $t+t_4$, в котором все транспортные ресурсы возвращаются в ССОП. Это означает, что $H_D(t + t_4) = 0$.

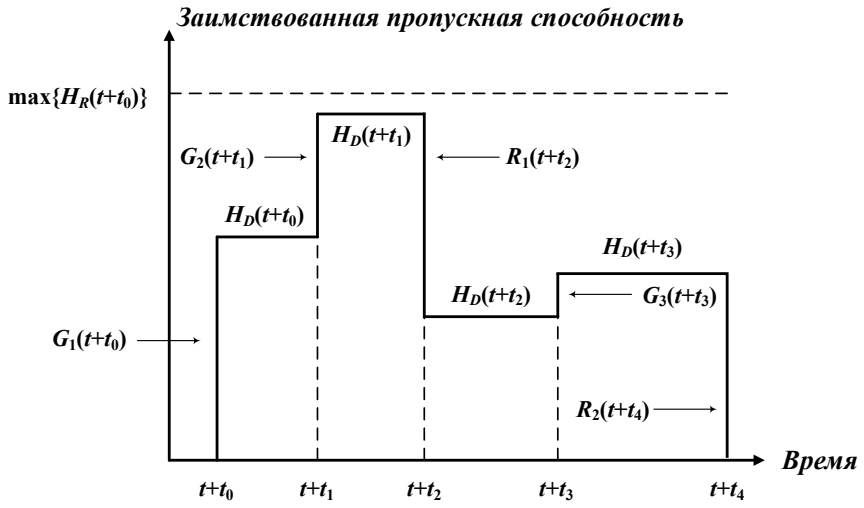


Рис. 1. Динамика изменений величины $H_D(t)$

Предполагается, что можно выделить четыре типичных отрезка времени. В начале каждого отрезка времени величина заимствованных ресурсов $H_D(t_j + t_{j+1})$ меняется почти мгновенно (j = 0, 1, 2, 3, 4). В эти моменты времени пропускная способность ССОП уменьшается или увеличивается в зависимости от потребности СССН в транспортных ресурсах.

Разработка правил ОТР включает, в основном, фиксацию значений t_j и оценку изменений функции $H_D(t)$. Критерий выбора рациональных правил ОТР можно сформулировать как обеспечение необходимой пропускной способности ССОП и СССН с учетом действующих показателей качества предоставления инфокоммуникационных услуг.

Модель обмена ресурсами

Для разработки модели, позволяющей исследовать процессы ОТР, целесообразно выбрать аналог в виде близкой, по своим формализованным характеристикам, совокупности операций. Схожие процессы типичны для систем с гистерезисом [4]. Применительно к телекоммуникационным сетям модель с гистерезисом использована в статье [5] для исследования алгоритмов управления трафиком в системах сигнализации. Особенность модели для исследования процессов ОТР заключается в том, что петля гистерезиса формируется для каждого отрезка времени вида (t_j+t_{j+1}).

Среди различных моделей гистерезиса [6] для исследуемого процесса особый интерес представляют конструкции, имеющие две особенности:

– основная практическая ценность заключается в изучении явлений, связанных с ростом величины $H_D(t_j + t_{j+1})$;
– изменение величины $H_D(t_j + t_{j+1})$ может быть представлена как многоуровневый гистерезис.

Это означает, что из всех изменений величины $H_D(t)$, изображенных на рис. 1, наиболее важны процессы на отрезках $H_D(t + t_1)$ и $H_D(t + t_3)$. Соответственно можно выделить три верхних порога гистерезиса. Количество нижних порогов также равно трем, включая нулевое значение функции $H_D(t)$. Величины приращений и снижений этой функции под номером k обозначены на рис. 1 при помощи зависимостей $G_k(t + t_j)$ и $R_k(\mathrm{r}\ t + t_j)$ соответственно. Буквы G и R, указывающие на приращение или снижение, образованы от аналогичных слов в английском языке – growth и reduction.

С практической точки зрения особый интерес связан с теми переходами между состояниями системы с многоуровневым гистерезисом, которые обозначены на рис. 2 римскими цифрами. Рассматриваемые переходы изображены пунктирными линиями со стрелками. Для количественного анализа подобных переходов контролируется интенсивность трафика, выраженная функцией $\lambda(t)$. Для выявления резкого роста трафика в статье [7] предлагается контролировать третью производную функции $\lambda(t)$. При составлении правил ОТР уместно анализировать также первую и вторую производные функции $\lambda(t)$.

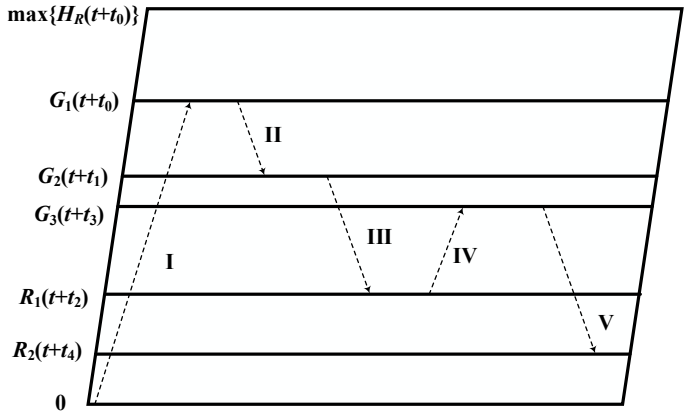


Рис. 2. Система с многоуровневым гистерезисом

При возникновении неординарных ситуаций функция $\lambda(t)$ может быть представлена моделью Тьюки-Хубера [8]:

$$\lambda(t) = (1-\pi)\lambda_{\pi}(t) + \pi\eta_{\pi}(t). \qquad (2)$$

Слагаемое $\lambda_{\pi}(t)$ – это типичное поведение интенсивности трафика, фиксируемое с вероятностью $(1–\pi)$. Параметр π определяет ту вероятность, с которой на фоне типичного процесса происходит резкий рост трафика, представимый функцией $\eta_{\pi}(t)$. Первое слагаемое в правой части формулы (2) в обычных условиях функционирования ССОП существенно больше величины $\pi\eta_{\pi}(t)$, которая может не учитываться при описании зависимости $\lambda(t)$.

После возникновения неординарных ситуаций значением $\pi\eta_\pi(t)$ пренебрегать нельзя. Величина π в существенной мере зависит от характера неординарного события.

Анализ модели и разработка правил ОТР

Функция $\lambda(t)$ определяется в процессе мониторинга трафика. Значения этой функции представимы гистограммой, в которой изменения величины $\lambda(t)$ фиксируются через отрезки времени τ. Пример представления функции $\lambda(t)$ в виде гистограммы приведен на рис. 3. Для предложенного примера выделены три типичные отрезка времени $[0, h\tau, l\tau, m\tau, n\tau, q\tau]$, в границах которых функция $\lambda(t)$ меняется с разной скоростью.

Отображение функции $\lambda(t)$ в виде гистограммы позволяет анализировать ее производные при помощи вычисления конечных разностей [9]. Предположим, что конечные разности i-го порядка образуют возрастающую последовательность. Это означает, что i-я производная функции $\lambda(t)$ также возрастает. Пусть на отрезках времени $[0, h\tau, l\tau, m\tau, n\tau, q\tau]$ возрастают последовательности конечных разностей первого, второго и третьего порядков соответственно. Тогда могут вводиться приращения $G_k(t+t_j)$, в которых индекс «k» определяется релевантным поведением конечных разностей.

Эта процедура представляет собой базовую часть правил обмена ОТР. Дополнительные части правил обмена ОТР могут быть выражены таким тезисом: «ССОП может передавать в СССН такой объем ресурсов, который не приведет к снижения качественных показателей тех услуг, перечень которых заранее установлен. Процесс передачи ресурсов из ССОП в СССН следует осуществлять превентивно, вычисляя конечные разности функции $\lambda(t)$».

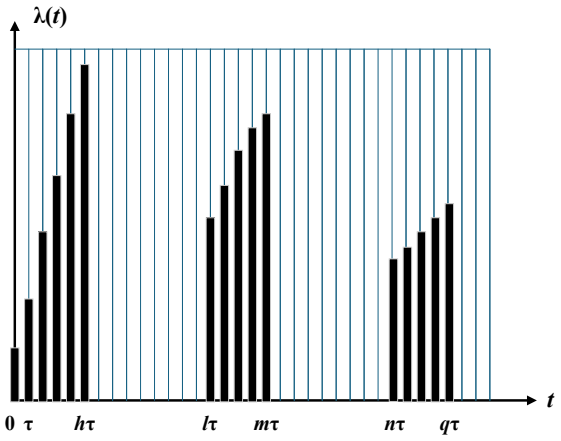


Рис. 3. Пример представления функции $\lambda(t)$ в виде гистограммы

Заключение

Предлагаемый подход к разработке правил ОТР должен рассматриваться как выбор начальных условий для оценки величин $G_k(t + t_j)$. Для получение более точных оценок для величин $G_k(t + t_j)$ уместно разработать нейронную сеть [10]. Обучение такой нейронной сети представляет собой нетривиальную задачу, так как неординарные события появляются редко и они, как правило, специфичны. По этой причине уместно использовать совокупность цифровых двойников [3]. В этом случае будет использована информационная база, которая включает статистику по значительному ряду сетей связи в разных субъектах России.

Список используемых источников

1. Шульгина Т. А. Современные подходы реализации теории социального обмена. – Психологические науки, 2022. №1 (30). С. 6–11.

2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. Том 1. М.: Вильямс, 2021, 704 с.

3. Crespi N., Drobot A. T., Minerva R. The Digital Twin. Springer, 2023, 1250 p.

4. Красносельский М. А. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 1984. 272 с.

5. Абаев П. О., Гайдамака Ю. В., Самуйлов К. Е . Гистерезисное управление сигнальной нагрузкой в сети SIP-серверов. Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. № 4. 2011. С. 55–73.

6. Mayergoyz I.D. Mathematical models of hysteresis and their applications. –Elsevier, Amsterdam, Academic Press, 2003, 498 p.

7. Гойхман В. Ю., Леваков А. К., Маршак М. А., Соколов Н. А. Оценка роста интенсивности входящего трафика // Электросвязь, 2018. № 3. С. 75–77.

8. Huber P.J. Robust Statistics. New York, John Wiley and Sons, 1981. 308 p.

9. Гельфонд А. О. Исчисление конечных разностей. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959, 400 с.

10. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия–Телеком, 2013. 384 с.

Статья представлена научным руководителем, начальником отдела Филиала НИЦ Телеком в г. Санкт-Петербурге, доктором технических наук, с.н.с., Н. А. Соколовым.

RULES FOR THE EXCHANGE OF RESOURCES BETWEEN TELECOMMUNICATION NETWORKS IN THE CONTEXT OF EXTRAORDINARY EVENTS

Fedorov A.
Branch of the Scientific Research Center Telecom in St. Petersburg

When unusual events of various nature occur, it is usually necessary to transfer part of the resources of a public communication network to a special-purpose communication network.

Such an operation requires the development of scientifically based rules that represent a compromise solution between the needs of a special-purpose communications network and the capabilities of a public communications network. The article offers rational solutions to emerging problems for typical situations generated by extraordinary events. They are based on the research results of a mathematical model that adequately reflects the process of resource exchange between telecommunication networks in conditions of extraordinary events.

Key words: special purpose communication network, extraordinary event, communication network resources

УДК 621.396.677
ГРНТИ 47.45.29

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА MUSIC ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛА ПРИХОДА СИГНАЛА НА SDR-ДЕМОНСТРАТОРЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ

Г. А. Фокин, Н. В. Шеремет

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена экспериментальной апробации алгоритма оценки угла прихода MUSIC. Исследование проведено на демонстраторе на базе программно-конфигурируемого радио с четырехэлементной антенной решеткой. В ходе измерений оценивались метрики точности и стабильности алгоритма в широком секторе углов. Результаты подтвердили повышенную точность оценки в «ожидаемом» диапазоне, определяемом диаграммой направленности элементов решетки. Практическая значимость работы заключается в валидации подхода на базе программно-конфигурируемого радио для прототипирования алгоритмов диаграммообразования.

SDR, USRP, MUSIC, антенная решетка

Современные и перспективные стандарты сетей радиодоступа пятого и шестого поколений широко применяют антенные решетки и технологии диаграммообразования, чтобы обеспечить показатели пропускной способности, скорости и емкости сети, соответствующие постоянно растущим требованиям пользователей. Адаптивное формирование диаграмм направленности на антенных решетках (АР) позволяет компенсировать потери при распространении радиоволн в диапазоне миллиметровых волн, а также повысить емкость сети за счет применения пространственного разделения сигналов.

Формированию диаграммы направленности предшествует процедура оценки углов прихода сигналов соответствующими алгоритмами. Исследование данных алгоритмов и их апробация могут осуществляться посредством практических экспериментов с использованием реальной АР и макетов на основе устройств программно-конфигурируемого радио (Software Defined Radio, SDR) с реальными радиотрактами.

В данной работе проводится экспериментальная апробация алгоритма оценки угла прихода MUSIC на разработанном SDR-демонстраторе технологии диаграммообразования [0] с применением четырехэлементной АР в лабораторных условиях.

SDR-демонстратор технологии диаграммообразования предназначен для прототипирования систем АР и апробации алгоритмов диаграммообразования и оценки угла прихода сигналов. Приемопередающей частью демонстратора являются две двухканальные платы программно-конфигурируемого радио USRP B210 [0]. Для корректного объединения двух SDR устройств в одну четырехканальную систему с частотной, фазовой и временной синхронизацией радиоканалов отдельных плат используются устройства «Метроном». Сервер точного времени «Metronom-PTP-1U-V2» [0] генерирует сигналы частотной и временной синхронизации, а транслятор «Метроном-Т» [0] передает эти сигналы на SDR устройства. Антенная решетка SDR-демонстратора состоит из четырех направленных антенн Уда-Яги диапазона 2400 МГц с шириной главного лепестка 60°. Антенны размещены на расстоянии 0,5 длины волны для частоты 2400 МГц. Направленные антенны используются для снижения уровня помех и влияния переотраженных сигналов на измерения. На рис. 1. приведена схема SDR-демонстратора технологии диаграммообразования.

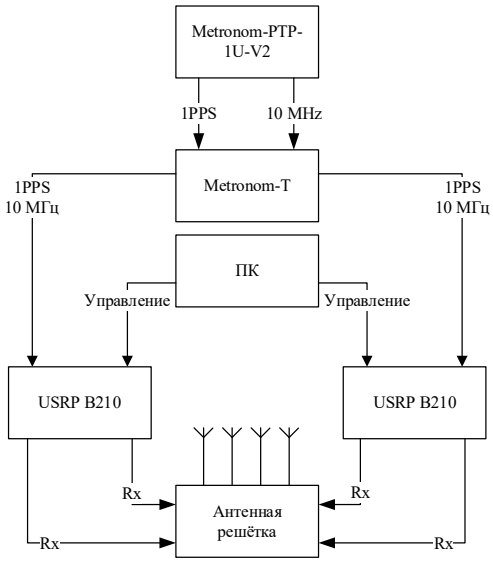


Рис. 1. Схема SDR-демонстратора

Для управления устройствами программно-конфигурируемого радио в демонстраторе используется разработанное специальное программное обеспечение (СПО) на базе драйвера устройств USRP (UHD) [0]. Данное СПО обеспечивает проведение процедур синхронизации SDR устройств, ка-

либровки каналов, приема сигнала, его предобработки и обработки алгоритмами диаграммообразования и оценки угла прихода, а также графическое представление результатов.

Алгоритм MUSIC [0] (MUltiple SIgnal Classification – классификация множественных сигналов) – это подпространственный алгоритм оценки угла прихода высокого разрешения. Разделение принятого сигнала на подпространства сигнала и шума позволяют исключить влияние последнего и тем самым повысить разрешающую способность, – минимальный угол различения сигналов. MUSIC – это алгоритм высокого разрешения, так как угол его разрешающей способности меньше ширины главного лепестка антенной решетки. Алгоритм способен производить оценку углов прихода для нескольких сигналов, число которых ограничено числом элементов N в АР и составляет $N-1$.

Результатом работы алгоритма MUSIC является псевдоспектр:

$$P(\Theta)=\frac{\mathbf{a}^H(\Theta)\mathbf{a}(\Theta)}{\mathbf{a}^H(\Theta)E_nE_n^H\mathbf{a}(\Theta)}, \quad (1)$$

где $\mathbf{a}(\theta)$ – вектор отклика антенной решетки, E_n и E_n^H – собственные векторы, шумового пространства. Векторы сигналов лежат в сигнальном подпространстве и ортогональны шумовому подпространству. Пики псевдоспектра соответствуют углам прихода сигналов.

Для экспериментальной апробации алгоритма MUSIC была проведена серия измерений с помощью SDR-демонстратора технологии диаграммообразования. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

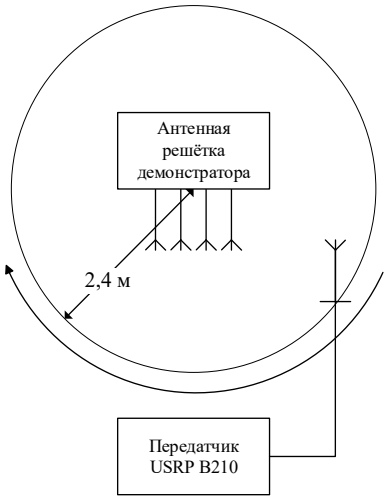


Рис. 2. Схема эксперимента по оценке угла прихода алгоритмом MUSIC

На рис. 3. показаны SDR-демонстратор и антенная решетка в ходе выполнения эксперимента.

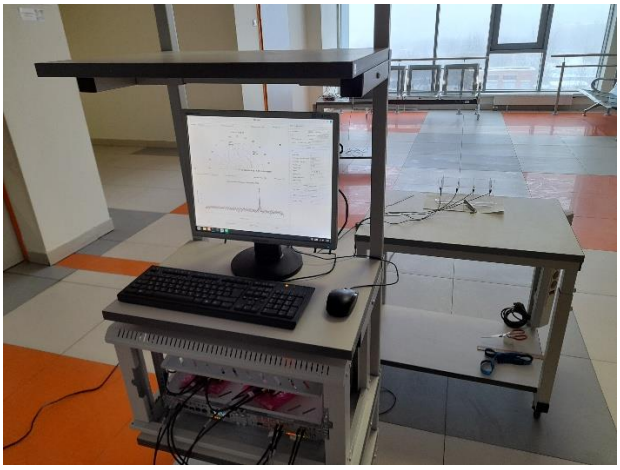


Рис. 3. Фотография эксперимента по оценке угла прихода алгоритмом MUSIC

В ходе эксперимента проводилось измерение известного угла прихода сигнала от единственного источника на антенную решетку алгоритмом MUSIC для углов от -65° до 65° относительно нормали решетки с шагом 5°. Для каждого угла производилось пять замеров. В качестве сигнала приема выступала синусоида на частоте 2401 МГц. Источником сигнала являлась отдельная плата SDR USRP B210 в одноканальном режиме с подключенной штыревой антенной диапазона 2400 МГц. Антенна передатчика располагалась на расстоянии 2,4 м от антенной решетки для соответствия критерию дальней зоны, которая для данной решетки начинается с 0,56 м.

По вычисленным в ходе эксперимента углам были рассчитаны метрики, характеризующие точность оценки угла прихода алгоритмом MUSIC. Абсолютное смещение – модуль разницы действительного значения угла прихода и среднего по пяти измеренным алгоритмом MUSIC. Среднеквадратическое отклонение (СКО) – мера разброса данных выборки относительно среднего, можно считать характеристикой стабильности результата. RMSE (Root Mean Square Error, Среднеквадратическая ошибка) – средняя величина ошибки между действительным значением и полученными при измерениях; лучше, чем смещение говорит о точности измерений, так как учитывает выбросы.

В АР SDR-демонстратора используются направленные антенны с шириной лепестка 60°, поэтому наибольшие точность и стабильность ожидаются в секторе от -30° до 30°, далее «ожидаемый» диапазон. В таблице 1 приведена сводная таблица для полного диапазона измерений от -65° до 65°

(в два раза больше ширины лепестка элемента). В таблице 2 сводная таблица приведена для «ожидаемого» диапазона.

ТАБЛИЦА 1. Вторичные метрики для диапазона углов от -65° до 65°

	Абсолютное смещение, °	СКО, °	RMSE, °
Среднее значение	2,81	0,446	2,878
Минимальное значение	0,02	0,089	0,100
Максимальное значение	11,24	1,853	11,252
Первый квартиль	0,7	0,191	0,840
Второй квартиль	1,84	0,286	1,913
Третий квартиль	3,37	0,592	3,380

ТАБЛИЦА 2. Вторичные метрики для диапазона углов от -30° до 30°

	Абсолютное смещение, °	СКО, °	RMSE, °
Среднее значение	1,45	0,372	1,531
Минимальное значение	0,02	0,089	0,100
Максимальное значение	3,98	0,888	3,988
Первый квартиль	0,46	0,195	0,516
Второй квартиль	1,58	0,265	1,676
Третий квартиль	1,84	0,598	1,913

Из данных таблиц 1 и 2 следует, что значения СКО для обоих диапазонов отличаются слабо, что свидетельствует о стабильности производимой алгоритмом оценки угла прихода. Так для 25 % (первый квартиль) лучших результатов СКО, мера разброса, ниже 0,191° и 0,195° для полного и «ожидаемого» диапазонов соответственно. Мера точности RMSE для двух диапазонов отличается больше: RMSE полного диапазона на 68,5 % в среднем и на 61,4 % для первого квартиля больше, чем у «ожидаемого» из-за большего смещения. Данная разница свидетельствует о корректности предположения о существовании «ожидаемого» диапазона лучших результатов, ограниченного диаграммой направленности отдельных элементов АР.

В работе проведена экспериментальная апробация алгоритма оценки угла прихода MUSIC на разработанном четырехканальном SDR-демонстраторе технологии диаграммообразования. Анализ метрик показал, что в «ожидаемом» диапазоне углов (±30°), ограниченном диаграммой

направленности элементов антенной решетки, достигается существенно более высокая точность оценки. При этом стабильность оценки (характеризуемая СКО) остается высокой во всем исследуемом секторе. Полученные результаты демонстрируют практическую применимость предложенного SDR-подхода для прототипирования и исследования алгоритмов пространственной обработки сигналов, актуальных для современных и перспективных сетей мобильной связи.

Список используемых источников

1. Фокин Г. А., Шеремет Н. В. Постановка задачи экспериментальной апробации многоантенных систем на основе программно-конфигурируемого радио // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024). Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей: в 2 т. Санкт-Петербург, 2025. Т. 1. С. 125–131.

2. USRP B210. Ettus Research. URL: https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/ (дата обращения: 30.04.2026).

3. Metrotek Сервер точного времени Метроном-PTP-1U. URL: https://metrotek.ru/?p=4209 (дата обращения: 30.04.2026).

4. Metrotek Трансляторы Радиус-50-T, Метроном-T. URL: https://kbmetrotek.ru/metronom-t/ (дата обращения: 16.06.2026).

5. UHD Python API. URL: https://kb.ettus.com/UHD_Python_API (дата обращения: 30.04.2026).

6. Gross F. B. Smart antennas for wireless communications with Matlab. New York: McGraw-Hill, 2005. 187 p.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры БТС СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Г. А. Фокиным.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE MUSIC ALGORITHM FOR SIGNAL DIRECTION-OF-ARRIVAL ESTIMATION USING AN SDR-BASED BEAMFORMING TESTBED

Sheremet N., Fokin G.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the experimental testing of the MUSIC direction-of-arrival estimation algorithm. The research was carried out on a software defined radio testbed with a four-element antenna array. During the measurements, the accuracy and stability metrics of the algorithm were evaluated over a wide sector of angles. The results confirmed increased estimation accuracy within the "expected" range, determined by the radiation pattern of the array elements. The practical significance of the work lies in the validation of the software defined radio based approach for prototyping beamforming algorithms.

Key words: SDR, USRP, MUSIC, antenna array

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 621.396
ГРНТИ 47.14.17

К ВОПРОСУ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА, ПРИНИМАЕМОГО ОТ ЗАВИСАЮЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПОМЕХ

В. А. Авдяков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрена проблема оптимального обнаружения сигнала, принимаемого от зависающего летательного аппарата на фоне пассивной помехи в условиях многолучевости. Сформулированы модели излучаемых и принимаемых сигналов, помех и шумов, которые необходимы для решения задачи обнаружения многолучевого сигнала.

обнаружение сигнала, помехи, многолучевость, зависающий летательный аппарат

Вопросы обнаружения сигналов, принимаемых на фоне пассивных помех, исследовались в [1]. Однако описанные в ней системы селекции движущихся целей (СДЦ) оказываются неработоспособными в случае зависающих летательных аппаратов, таких типов как вертолет, а также одноротор-ных или мультироторных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) ввиду того, что доплеровская скорость таких воздушных объектов оказывается близкой или равной нулю. Во многих случаях условия приема характеризуются дополнительно тем, что к раскрыву антенной решетки наряду с волновым фронтом сигнала при его прямом распространении поступают с некоторым запаздыванием волновые фронты сигналов, обусловленные многолучевым распространением энергии. По сути, такие мешающие сигналы представляют собой задержанные во времени и взвешенные копии входного сигнала. Поэтому их можно считать дополнительной помехой, ухудшающей качество приема основного прямого сигнала от цели. Далее ее будем называть – многолучевой помехой. Подобная ситуация имеет место,

например, в случае, когда осуществляется обнаружение цели, находящейся над гладкой морской поверхностью.

Обычно считается [1, 2], что сигналы, пассивные и многолучевые помехи подчиняются гауссовскому закону распределения вероятностей и их статистические характеристики (СХ) полностью известны. Это означает, что имеется априорная информация о направлениях прихода полезного сигнала и многолучевых помех. Для конкретизации постановочной части задачи обнаружения сформулируем модели излучаемых и принимаемых сигналов, помех и шумов.

Комплексную огибающую сигнала при многолучевом распространении запишем в виде Nмерного случайного процесса (СП)

$$\vec{S}_{\Sigma}(t) = \vec{S}(t, \theta_0) + \sum_{i=1}^{p} \vec{S}_i(t, \rho_i, \tau_i, \theta_i), \qquad (1)$$

где ρ_i^2- мощность сигнала, приходящего по i-му лучу, τ_i- задержка сигнала, соответствующая i-му лучу, θ_i – угол между нормалью к плоскости фазированной антенной решетки (ФАР) направлением прихода сигнала по i-му лучу, p-число лучей.

Используя (1), для случая разделяющейся обработки запишем комплексную огибающую медленно флуктуирующего сигнала при многолучевом распространении электромагнитных (ЭМ) волн

$$\vec{S}_{\Sigma}(t) = \rho_0 \vec{g}(\theta_0) f(t - \tau_0)\, exp[-j\omega_D \tau_0] + \sum_{i=1}^{p} \rho_i \vec{g}_i(\theta_i)\, f(t - \tau_i)\, exp[-j\omega_D \tau_i], \qquad (2)$$

где $\vec{g}_i(\theta_i)$ – вектор волнового фронта i-го луча, для которого справедливо условие нормировки $[\vec{g}_i^{*}(\theta_i)\vec{g}_i(\theta_i)] = 1$, $f(t-\tau)$ – комплексная огибающая излучаемого сигнала, ω_D- частота Доплера, $\rho_i, i = 0,1,\ldots,p$ – гауссовская случайная величина, имеющая следующие СХ: $M[\rho_i] = 0$, $M[\rho_i^2] = \sigma_i^2$, $M[\cdot]$ – означает, что выполняется операция вычисления математического ожидания от выражения.

Величина σ_i^2учитывает коэффициенты усиления антенн, затухание на пути распространения сигнала и эффективную площадь рассеяния цели. Функция $f(t)$ является комплексной огибающей сигнала. Предполагается, что она нормируется согласно условию $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2\, dt = 1$.

Такой сигнал характерен для целей, движущихся равномерно и прямолинейно в зоне обзора РЛС. Обычно именно он рассматривается в литературе при многолучевом распространении ЭМ волн [2].

Модель цели с доплеровским рассеянием [1] обобщим на случай приема сигнала от зависающего летательного аппарата при многолучевом распространении отраженной ЭМ волны.

Комплексную огибающую такого сигнала определим следующим образом

$$\vec{S}_{\Sigma}(t) = \rho_0 \vec{g}(\theta_0) b_D(t - \tau_0 - \lambda/2)\, f(t - \tau_0 - \lambda) + \sum_{i=1}^{p} \rho_i \vec{g}_i(\theta_i)\, f(t - \tau_i - \lambda/2) b_D(t - \tau_i - \lambda/2), \quad (3)$$

где $b_D(t)$ – выборочная функция комплексного гауссовского СП, связанная с эффектом Доплера. Предполагается, что функция $b_D(t)$ по сравнению с несущей частотой зондирующего сигнала изменяется медленно. СП $b_D(t)$ полностью определяется его комплексной ковариационной функцией $K_D(\tau) = M\left[b_D(t)\bar{b}_D(t-\tau)\right]$, где $\bar{b}_D(t-\tau)$ – комплексно-сопряженная функция.

Комплексную огибающую пассивной помехи, принимаемой ФАР РЛС, определим выражением

$$\vec{n}(t) = \frac{1}{N}\vec{1}\sqrt{E_t}\int_{-\infty}^{\infty} f(t-\lambda)\vec{b}(t-\lambda/2,\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

где $b(t,\lambda)$ – комплексный гауссовский СП, независимые переменные которого – пространство и время, $\vec{1}$- единичный вектор, все компоненты которого равны 1. Относительно $\vec{b}(t,\lambda)$ предполагается, что $M[\vec{n}(t)] = M\left[\vec{b}(t,\lambda)\right] = \vec{0}$ и ковариационная матрица $M\left[\vec{b}(t,\lambda)\vec{b}^{*}(v,\lambda_1)\right] = K_{DR}(t - v,\lambda)\delta(\lambda - \lambda_1)$,$*$ – символ эрмитова сопряжения.

Оптимальное обнаружение сигнала, принимаемого от зависающего вертолета на фоне пассивной помех в условиях многолучевости, трактуется как проверка двух гипотез.

В первом случае можно рассматривать сам факт наличия цели от вертолета без учета фактора многолучевости. Тогда гипотеза состоит в том, что принятое колебание содержит пассивную помеху, приходящую от дважды протяженной цели [1]. Альтернатива предполагает наличие пассивной помехи в смеси с сигналом и многолучевой помехой.

$$H_0: \quad \vec{\xi}(t) = \vec{n}(t) + \vec{w}(t),$$
$$H_1: \quad \vec{\xi}(t) = \rho_0 \vec{g}(\theta_0) f(t - \tau_0)\, exp(-j\omega_0\tau_0) + \sum_{i=1}^{p} \rho_i \vec{g}_i(\theta_i)\, f(t - \tau_i)\, exp(-j\omega_0\tau_i) + \vec{n}(t) + \vec{w}(t), \quad (5)$$

где $\vec{w}(t)$ – векторный случайный процесс белого гауссовского шума с $M[\vec{w}(t)] = \vec{0}$, а ковариационная матрица равна $M[\vec{w}(t)\vec{w}^*(\upsilon)] = D\delta(t - \upsilon)$, D – диагональная матрица.

Во втором случае, когда интерес представляет только полезный сигнал, решается задача обнаружения прямого сигнала на фоне многолучевой и пассивной помех.

$$H_0: \quad \vec{\xi}(t) = \sum_{i=1}^{p} \rho_i \vec{g}_i(\theta_i)\, f(t - \tau_i)\, exp(-j\omega_0\tau_i) + \vec{n}(t) + \vec{w}(t)$$

$$H_1: \quad \vec{\xi}(t) = \rho_0\vec{g}(\theta_0) f(t - \tau_0)\, exp(-j\omega_0\tau_0) + \sum_{i=1}^{p} \rho_i \vec{g}_i(\theta_i)\, f(t - \tau_i)\, exp(-j\omega_0\tau_i) + \vec{n}(t) + \vec{w}(t) \quad (6)$$

Алгоритм оптимальной обработки при обнаружении многолучевого сигнала, определяемого (2), на фоне пассивных помех в РЛС с ФАР имеет следующий вид:

$$l = \int_{T_1}^{T_2}\int_{T_1}^{T_2} \vec{\xi}^*(t) Q(t,\upsilon)\hat{\vec{S}}_\Sigma(\upsilon)dtd\upsilon - \frac{1}{2}\int_{T_1}^{T_2}\int_{T_1}^{T_2} \vec{\xi}^*(t) Q(t,\upsilon)\hat{\vec{S}}_\Sigma(\upsilon)\, dtd\upsilon \gtrless \gamma, \quad (7)$$

где $\hat{\vec{S}}_\Sigma(\upsilon)$ – реализуемая оценка многолучевого сигнала (2) по критерию минимума среднего квадрата ошибки (МСКО), $Q(t,\upsilon)$ – матричная функция, обратная ковариационной матрице совокупности пассивных помех и белого шума,γ – порог обнаружения.

Выражение для оптимальной обработки при проверке гипотез (6) определяется (7), в котором под $Q(t,\upsilon)$ следует понимать матрицу, обратную ковариационной матрице совокупности $\sum_{i=1}^{p} \rho_i \vec{g}_i(\theta_i)\, f(t - \tau_i - \lambda/2) b_D(t - \tau_i - \lambda/2)$, пассивных помех и белого шума.

Выводы

Существует по крайней мере два важных случая решения задачи обнаружения многолучевого сигнала. Первый из них предполагает, что время запаздывания по каждому из лучей больше длительности излучаемого зондирующего сигнала. Он соответствует случаю приема ортогональных *p*-сигналов. В этом случае можно рассматривать задачу обнаружения многолучевого сигнала как задачу обнаружения каждого из p разрешимых по дальности сигналов и независимо осуществлять оценивание каждого из *p*-сигналов и его параметров.

Более интересен случай, когда длительность зондирующего сигнала много больше времени запаздывания сигналов по каждому из лучей. Он соответствует задаче полного разрешения по всем измеряемым параметрам прямого сигнала и сигналов, пришедших по *p*-лучам на фоне пассивных помех.

В реальных условиях работы РЛС подобная информация отсутствует и поэтому приходится решать задачу в условиях параметрической априорной неопределенности (СХ) пассивной и многолучевой помех, а также сигнала адаптивными методами [3].

Список используемых источников

1. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т III. Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовских сигналов на фоне помех. М.: Советское радио, 1977. 664 с.

2. Кириллов Н. Е. Об оптимальной пространственно – временной обработке сигналов в условиях многолучевости и сосредоточенных помех // Передача информации по радиоканалам, содержащим статистические неоднородные среды: Сборник статей / Отв. ред. В. И. Сифоров, А. В. Просин. М.: Наука, 1976. 238 с.

3. Давыдов В. С., Лукошкин А. П., Шаталов А. А., Ястребков А. Б. Радиолокация сложных целей (разрешение и распознавание). СПб.: Янис, 1993, 280 с.

ON THE ISSUE OF DETECTING, A SIGNAL RECEIVED FROM HOVERING AIRCRAFT IN THE PRESENCE OF INTERFERENCE

Avdyakov V.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The problem of optimal detection of a signal received from a hovering aircraft against a background of passive interference in multipath conditions is considered. Models of emitted and received signals, interferences and noises are formulated, which are necessary for solving the problem of detection of a multipath signal.

Key words: signal detection, interferences, multipath, hovering aircraft

УДК 004.414.23
ГРНТИ 50.41.25

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

В. С. Авраменко

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Приведены недостатки традиционных методов мониторинга окружающей среды. Рассмотрены задачи мониторинга, которые могут быть эффективно решены с помощью беспилотных летальных аппаратов, реализующих обработку на борту получаемых от сенсоров данных мониторинга с использованием технологий машинного обучения. Сформулированы проблемные вопросы реализации моделей машинного обучения на бортовых вычислительных устройствах беспилотных летальных аппаратов, обусловленные ограничениями технического характера, предложены пути их решения.

мониторинг, окружающая среда, беспилотные летательные аппараты, машинное обучение, оперативность

В условиях нарастающего антропогенного воздействия на природу и происходящих климатических изменений возникает потребность в эффективных средствах и системах мониторинга окружающей среды.

Под мониторингом окружающей природной среды понимаются регулярные, выполняемые по заданной программе, наблюдения природных сред (атмо-, гидро- и литосферы), природных ресурсов растительного и животного мира, которые позволяют определить экологическое состояние названных сред и объектов, происходящие в этих средах и объектах процессы под влиянием антропогенной деятельности, контролировать и управлять состоянием окружающей природной среды [1].

Традиционные методы мониторинга (наземные обследования, дистанционное зондирование Земли) уже не в полной мере соответствуют современным требованиям. В частности, им присущи такие недостатки как недостаточно высокая оперативность обработки и передачи данных мониторинга, высокая трудоемкость, значительные затраты [2].

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с обработкой данных на борту с использованием методов машинного обучения поз-

волит существенно повысить эффективность экологического мониторинга, так как БПЛА способны обеспечить охват обширных территорий, доступ к труднодоступным и опасным зонам, высокую пространственную детализацию данных, непрерывность наблюдений, экономическую эффективность, безопасность информации.

Для решения задач мониторинга окружающей среды современные БПЛА оснащаются набором сенсоров для сбора и анализа экологических данных (гиперспектральные камеры, тепловизоры, газоанализаторы, лидары, датчики качества воздуха, и др.). С целью повышения оперативности и точности мониторинга данные от сенсоров в ряде случаев целесообразно обрабатывать на борту непосредственно во время полета, в том числе и на основе моделей машинного обучения.

К задачам, которые могут быть эффективно решены на борту БПЛА в интересах мониторинга окружающей среды с помощью машинного обучения, можно отнести следующие:

– классификация и сегментация изображений (модели машинного обучения могут определять зоны загрязнения водоемов, участки вырубки лесов, несанкционированные свалки, изменения растительного покрова);
– выявление аномалий (утечки, нефтепродуктов, очаги лесных пожаров, выбросы промышленных предприятий и другие экологические аномалии);
– прогнозирование экологических процессов;
– анализ мультиспектральных данных;
– создание 3D-моделей территорий.

Вместе с тем, внедрению технологий машинного обучения в бортовые вычислительные системы препятствует ряд ограничений. В частности, для реализации машинного обучения на борту БПЛА требуются высокопроизводительные компактные вычислительные устройства, обеспечивающие первичную обработку данных в реальном времени, фильтрацию шумов, сжатие информации перед передачей, целевую обработку данных на основе машинного обучения непосредственно в полете. Примерами малогабаритных вычислительных устройств, размещаемых на борту современных БПЛА для реализации моделей машинного обучения, являются встроенные вычислительные модули *NVIDIA Jetson* (модели *Nano, TX1, TX2, Xavier* и др.), нейронные ускорители *Intel Movidius NCS, Google Coral TPU*), *FPGA* (программируемая пользователем вентильная матрица).

Но отсутствие малогабаритных высокопроизводительных вычислительных средств отечественного производства и введенные в отношении России санкции существенно усложняют доступ к современным вычислительным устройствам.

Также проблемным вопросом является энергоснабжение высокопроизводительных вычислительных устройств на борту БПЛА.

Одним из путей решения вышеуказанных проблемных вопросов является применение оптимизированных нейросетей для уменьшения вычислительной сложности нейросетевых моделей при сохранении приемлемой точности с целью возможности реализации на доступных вычислительных устройствах с ограниченной производительностью и памятью.

Основные известные методы оптимизации нейронных сетей следующие:

– Прунинг (обрезка). Суть данного метода заключается в удалении малозначащих связей между нейронами.
– Квантование. Заключается в уменьшении разрядности чисел, используемых для весов нейросети.
– Кластеризация весов. При использовании данного метода модель «сжимается» за счет замены исходной матрицы уникальных значений весов на модифицированную матрицу, содержащую индексы значений центроидов и значения центроидов.

Кроме того, компактные нейросети, обладающие высокой точностью, могут быть получены на основе метода «дистилляции нейросетей». Суть метода заключается в обучении компактной «простой» нейронной сети (сети-ученика) при помощи другой, заранее обученной большой «сложной» сети (сети-учителя).

Также задача оптимизации нейронных сетей может быть решена с помощью технологий автоматизации проектирования нейронных сетей (*Neural Architecture Search*, *NAS*) [3].

Выбор методов оптимизации нейросетей для реализации на малогабаритных вычислительных устройствах ограниченной производительности определяется конкретным набором задач мониторинга окружающей среды, решаемыми БПЛА, и доступными аппаратными средствами.

Для оперативной и точной оценки вариантов моделей машинного обучения в процессе их оптимизации могут быть использованы средства автоматизированного оценивания моделей машинного обучения [4].

Таким образом, внедрение систем обработки данных на основе машинного обучения на борту БПЛА в интересах мониторинга окружающей среды позволит существенно повысить оперативность и точность мониторинга. Кроме того, обеспечивается непрерывность мониторинга, повышается защищенность и экономическая эффективность.

Список используемых источников

1. Экологический мониторинг: учебное пособие для обучающихся образовательных учреждений высшего профессионального образования / Д. А. Козырь, Д. А. Макеева, Ю. А. Омельчук; Севастопольский государственный университет, кафедра «Радиоэкология и экологическая безопасность». Севастополь: СевГУ, 2023. 164 с.

2. Binetti M. S., Massarelli C., Uricchio V. F. Machine learning in geosciences: A review of complex environmental monitoring applications // Machine Learning and Knowledge Extraction. 2024. Т. 6. №. 2. С. 1263-1280.

3. Щербин А. С. Проблемы оценки качества архитектур нейронных сетей и алгоритмов поиска архитектур // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21. № 2. С. 51-62. DOI: 10.25205/1818-7900-2023-21-2-51-62.

4. Авраменко В. С., Чичков Е. С. Программный комплекс для экспериментальной оценки эффективности нейронных сетей // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 16-19.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING BY UNMANNED AERIAL VEHICLES

Avramenko V.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

The disadvantages of traditional methods of environmental monitoring are presented. The monitoring tasks that can be effectively solved using unmanned aerial vehicles that process monitoring data received from sensors on board using machine learning technologies are considered. The problematic issues of implementing machine learning models on onboard computing devices of unmanned aerial vehicles due to technical limitations are formulated, and ways to solve them are proposed.

Key words: monitoring, environment, unmanned aerial vehicles, machine learning, efficiency

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ В АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗНОРОДНЫХ ПОМЕХ

Н. О. Агейчик, Е. И. Глушанков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлено комплексное исследование эффективности адаптивных алгоритмов фильтрации в системах с антенными решетками при воздействии одиннадцати типов помех различной природы. Проведено 24200 вычислительных экспериментов с обработкой 193,6 миллионов точек данных. Исследованы алгоритмы: RLS и RLS с предварительной альфа-бета фильтрацией.

адаптивные фильтры, α-β фильтр, RLS-алгоритм, ОСШП (отношение сигнал/шум+помеха), эффект Доплера, БПЛА, математическое моделирование

Системы с антенными решетками широко применяются в радиолокации, радионавигации и системах связи [1]. Эффективность функционирования таких систем в значительной степени определяется способностью адаптивных алгоритмов подавлять помехи различной природы при сохранении полезного сигнала [2]. Современные беспроводные системы работают в условиях сложной электромагнитной обстановки, характеризующейся наличием разнородных помех: гармонических, импульсных, широкополосных, флуктуационных и комбинированных [3].

Адаптивные алгоритмы фильтрации, такие как NLMS (Normalized Least Mean Squares), RLS (Recursive Least Squares) и их модификации, позволяют динамически подстраивать параметры фильтра в соответствии с текущей сигнально-помеховой обстановкой [4].

Методология исследования

Рассмотрена линейная фазированная антенная решетка из $N_e = 8$ элементов. Сигнал на выходе n-го элемента антенной решетки в момент времени k описывается выражением:

$$x_n(k) = s_n(k) + \sum_{i=1}^{M} p_{n,i}(k) + w_n(k), \quad (1)$$

где $s_n(k)$ – полезный сигнал, $p_{n,i}(k)$ – i-я помеха, $w_n(k)$ – белый Гауссовский шум.

В исследовании рассмотрено 11 типов помех: комплексная гармоническая, белый гауссов шум, импульсная, сосредоточенная гармоническая, апериодическая, полупериодическая, с частотной манипуляцией, флуктуационная, полигармоническая, широкополосная и комбинированная помехи [5].

Алгоритм RLS минимизирует экспоненциально взвешенную сумму квадратов ошибок, обеспечивая более быструю сходимость по сравнению с NLMS, но требуя большего объема вычислений [6]. Алгоритм предполагает следующие этапы:

Выходной сигнал формируется в виде:

$$y(k) = W^T(k)x(k). \tag{2}$$

Коэффициент усиления Калмана находится из соотношения:

$$K(k) = \frac{P(k-1)x(k)}{\lambda + x^T(k)P(k-1)x(k)}. \tag{3}$$

Обновление инверсной корреляционной матрицы:

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}[P(k-1) - K(k)x^T(k)P(k-1)]. \tag{4}$$

Обновление весов:

$$W(k) = W(k-1) + K(k)e(k), \tag{5}$$

где λ – коэффициент забывания (использовано $\lambda = 0.90$), $\mathrm{P}(k)$ – инверсная корреляционная матрица размером $N_e \times N_e$.

Вычислительная сложность: $O(N_e^2)$ операций на итерацию. Для $N_e = 8$ требуется ~558 операций на отсчет, что в 10 раз больше, чем для NLMS.

Предварительная альфа-бета фильтрация

Для повышения эффективности подавления импульсных помех использован предварительный альфа-бета фильтр со следующими адаптивными параметрами:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \alpha_0(1 + 0{,}10|r(k)|), \\ \beta_k &= \beta_0(1 + 0{,}05|r(k)|), \end{aligned} \tag{6}$$

где базовые параметры $\alpha_0 = \beta_0 = 0{,}028$.

Для повышения эффективности подавления импульсных и полупериодических помех предложено использование предварительного альфа-бета фильтра – упрощенного варианта фильтра Калмана, основанного на модели постоянной скорости.

Модель системы:

$$\begin{bmatrix} p(k) \\ v(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(k-1) \\ v(k-1) \end{bmatrix},$$

где $p(k)$ – позиция (значение сигнала), $v(k)$ – скорость изменения, T_s– период дискретизации.

Прогноз:

$$\hat{p}(k|k-1) = \hat{p}(k-1) + \hat{v}(k-1)T_s. \quad (7)$$

Остаток:

$$r(k) = x(k) - \hat{p}(k|k-1). \quad (8)$$

Физический смысл: при больших отклонениях (импульсных помехах) коэффициенты α_k и β_k автоматически увеличиваются, обеспечивая более быструю адаптацию. При малых отклонениях фильтр работает консервативно, подавляя шум.

Вычислительная сложность: $O(N_e)$, примерно ~80 операций на отсчет для $N_e = 8$.

Проведено четыре серии экспериментов: влияние углового направления помехи (угол варьируется от 30° до 40°), разницы амплитуды сигнала и помехи (разница амплитуд от 1 до 11), сравнение алгоритмов для всех типов помех. Для каждой конфигурации выполнено 50 независимых экспериментов.

Результаты исследования

Наименьшие значения ОСШП были достигнуты в сценарии с импульсной помехой. Также минимумы ОСШП были достигнуты при полном совпадении угла к нормали антенны сигнала и помехи, так как помеха практически полностью подавляла полезный сигнал.

Значения ОСШП приведены на рисунках 1–2, по которым можно сделать следующие выводы:

1. Алгоритм RLS менее эффективен чем гибридный алгоритм RLS с α-β фильтром в нестационарных условиях, где присутствует эффект Доплера.

2. Уменьшение разницы углов прихода сигнала и помехи ведет к значительному снижению ОСШП для RLS алгоритма без предварительной фильтрации с помощью α-β фильтра, особенно в нестационарных условиях.

3. Увеличении импульсной помехи значительно снижает эффективность работы RLS алгоритма без предварительной фильтрации с помощью α-β фильтра.

4. RLS алгоритм с α-β фильтром демонстрирует стабильные показатели ОСШП во всех сценариях.

Предложенный комбинированный алгоритм RLS с адаптивным α-β предфильтром показал себя как эффективное решение для работы в условиях сложной помеховой обстановки. Адаптация коэффициентов α и β в реальном времени позволяет снизить влияние резких изменений сигнала, характерных для импульсных и полупериодических помех.

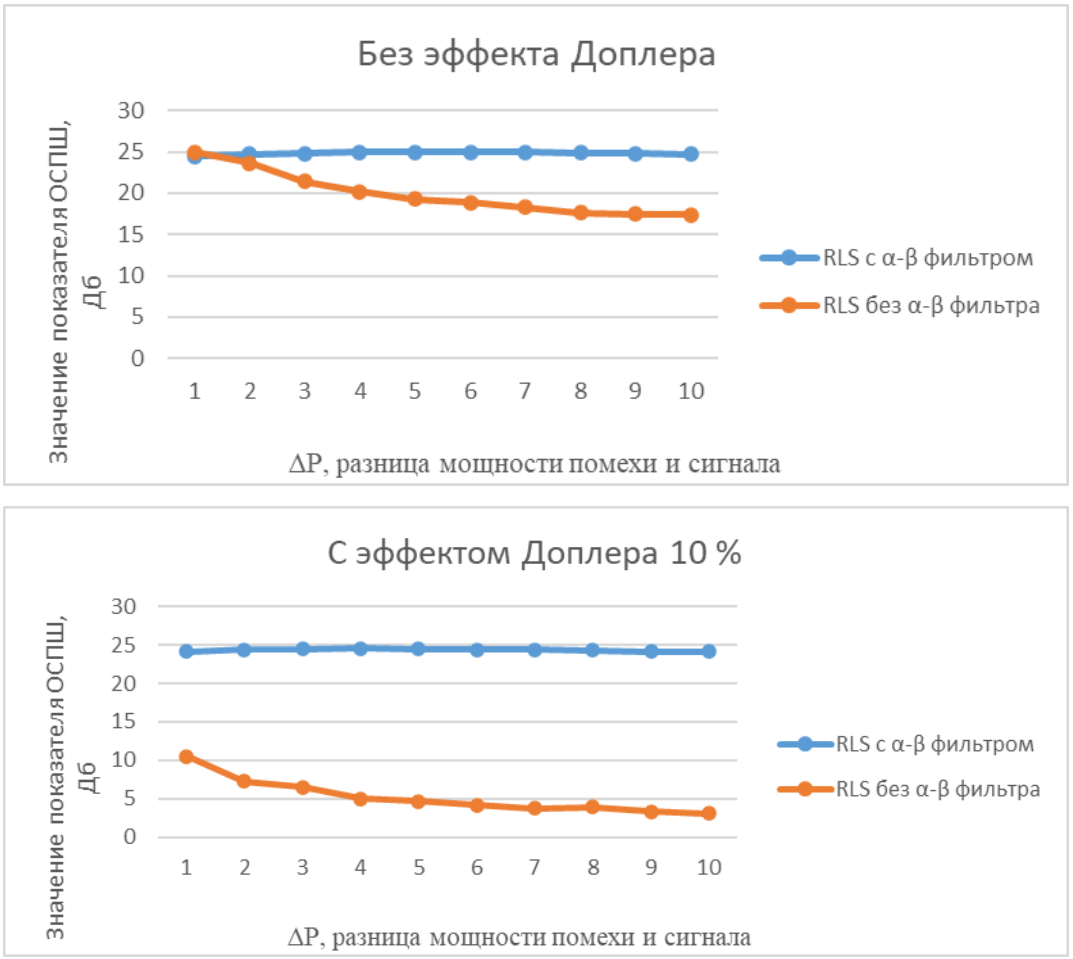


Рис. 1. Зависимость ОСШП от мощности импульсной помехи

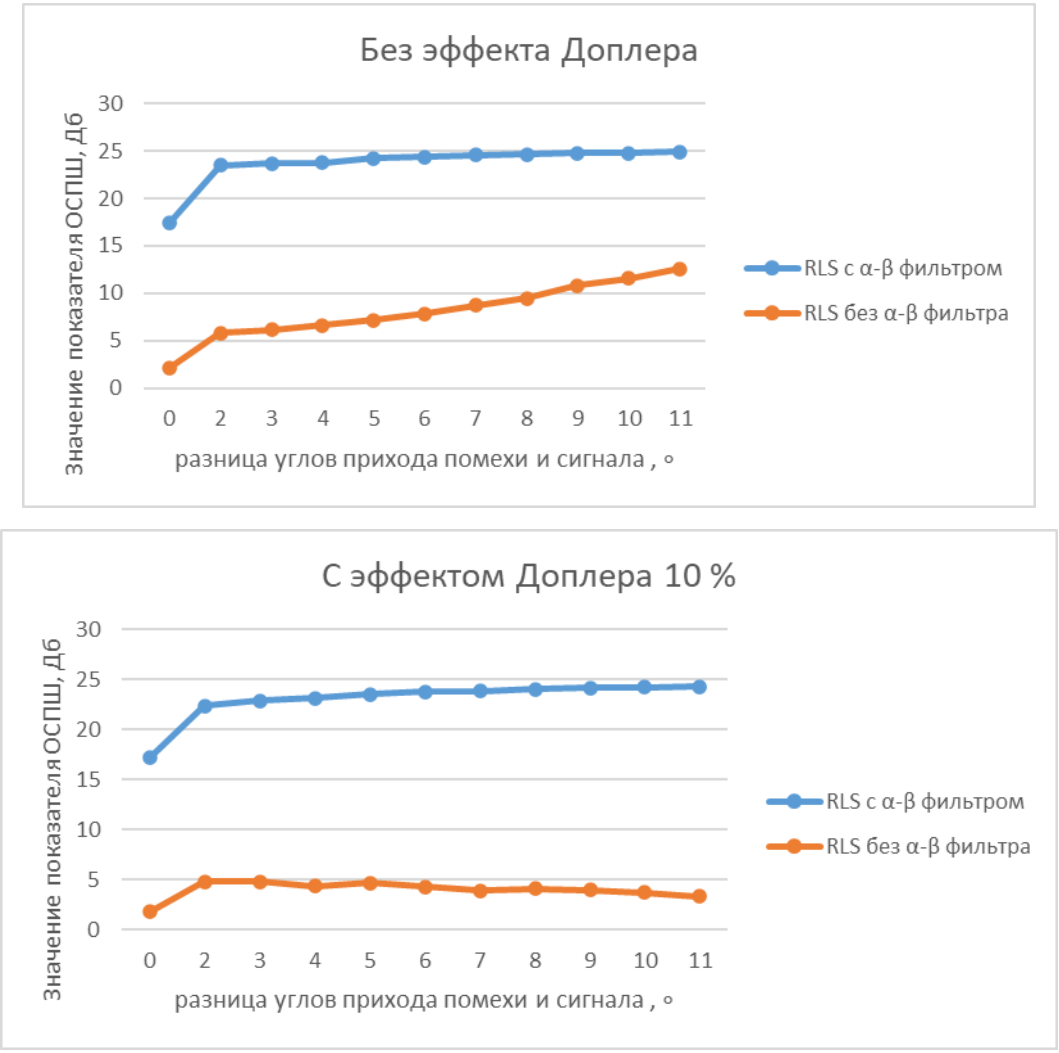


Рис. 2. Зависимость ОСШП от разницы углов прихода сигнала и импульсной помехи

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Эффективность гибридного алгоритма. Предложенный комбинированный алгоритм RLS с адаптивным α-β предфильтром продемонстрировал существенное преимущество перед классическим RLS алгоритмом в условиях воздействия импульсных и нестационарных помех. Наличие предварительной фильтрации позволило повысить помехоустойчивость системы, особенно в сценариях с эффектом Доплера и при изменении углов прихода сигнала и помехи.

2. Влияние параметров помехи на эффективность фильтрации. Наибольшее снижение ОСШП наблюдалось при совпадении углов прихода полезного сигнала и помехи, а также при увеличении мощности импульсной помехи. В этих условиях гибридный алгоритм показал стабильные результаты, в то время как эффективность RLS без предварительной фильтрации значительно снижалась.

3. Устойчивость к нестационарным условиям. Алгоритм RLS с α-β фильтром проявил высокую адаптивность в условиях нестационарности, вызванной движением цели (эффект Доплера), что подтверждает его перспективность для применения в антенных системах БПЛА.

4. Ограничения и пути оптимизации. Основным ограничением предложенного метода является увеличение вычислительной сложности, однако для антенных решеток с небольшим числом элементов (до 8–16) это не является критичным. Для дальнейшего развития метода возможна оптимизация алгоритма с целью снижения вычислительных затрат, а также его адаптация для решеток с большим количеством элементов.

5. Практическая значимость. Результаты работы могут быть использованы при проектировании адаптивных систем обработки сигналов в антенных решетках, работающих в условиях сложных и разнородных помех, включая системы РЭБ, радиолокационного наблюдения и беспроводной связи.

Список используемых источников

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

2. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.

3. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.

4. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th Edition. Pearson, 2014. 912 p.

5. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive Signal Processing. Prentice Hall, 1985. 474 p.

6. Солонина А. И., Улахович Д. А., Яковлев Е. Б. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 560 с. ISBN 978-5-9775-3946-3.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ADAPTIVE FILTERING ALGORITHMS IN ANTENNA ARRAYS UNDER THE INFLUENCE OF HETEROGENEOUS INTERFERENCES

Ageichik N.O., Glushankov E.I.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents a comprehensive study of the effectiveness of adaptive filtering algorithms in antenna array systems exposed to eleven types of interference of varying nature. A total of 24,200 computational experiments were conducted, processing 193.6 million data points. The following algorithms were examined: RLS and RLS with alpha-beta pre-filtering.

Key words: adaptive filters, α-β filter, RLS algorithm, SNR (signal-to-noise ratio), Doppler effect, UAV, mathematical modeling

УДК 543.27 + 004.327.5
ГРНТИ 31.15.33; 59.35.31

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОТЕНЦИОСТАТА ДЛЯ БЫСТРОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИИ И ПОТРЕБНОСТЬ В АВТОНОМНОМ УСТРОЙСТВЕ

Л. С. Адонин, В. В. Ефименко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Постановка задачи. В условиях широкого использования лабораторных грызунов – в частности, мышей (Mus musculus) и крыс (Rattus norvegicus) – в качестве модельных организмов в нейронауках особую актуальность приобретают автономные потенциостаты для быстрой циклической вольтамперометрии, способные функционировать без внешнего питания и проводных каналов передачи данных. В этом контексте важно понимать принцип работы потенциостатов на базе двухэлектродной системы.

Цель работы: обзор принципов работы потенциостатов быстрой циклической вольтамперометрии и формирование выводов о методике, которые могут быть полезны при разработке собственных аналоговых устройств, доступных на российском рынке, с ориентацией на проведение экспериментов in vivo.

FSCV, потенциостат, операционный усилитель, нейротрансмиттер, микроэлектрод, окислительно-восстановительные реакции

Введение

Быстрая циклическая вольтамперометрия (БЦВ; англ. fast-scan cyclic voltammetry, FSCV) реализуется в рамках двух- или трехэлектродной конфигурации, обеспечивающей стабильность и точность измерений в сложных биологических средах. В данной системе рабочий электрод – как правило, микроэлектрод из углеродного волокна – регистрирует изменения концентрации моноаминовых нейротрансмиттеров (в частности, дофамина и серотонина) посредством детекции наноамперных токов, возникающих в ходе потенциал-зависимых реакций окисления и восстановления и отражающих динамику их высвобождения в реальном времени [1, 2]. Электрод сравнения обеспечивает стабильный опорный потенциал, тогда как вспомогательный электрод выполняет функцию компенсации заряда, что позволяет поддерживать устойчивый режим потенциального сканирования.

Современные модификации метода, включая оптимизацию формы сканирующего потенциала и применение перспективных электродных матери-

алов – таких как углеродные нановолокна и бор-легированный алмаз, – значительно повышают чувствительность и селективность детекции широкого спектра нейрохимических соединений. Интеграция БЦВ с дополнительными аналитическими подходами, например спектроскопией электрохимического импеданса с преобразованием Фурье (FTEIS), способствует контролю состояния поверхности электрода и минимизации дрейфа сигнала в длительных экспериментах. Благодаря достижению миллисекундного временного разрешения и высокой пространственной точности метод позволяет исследовать кинетику высвобождения и обратного захвата нейротрансмиттеров как в условиях *in vitro*, так и *in vivo*, включая эксперименты на свободно передвигающихся животных [2]. Применение продвинутых алгоритмов обработки данных, таких как регрессия по главным компонентам, дополнительно усиливает способность метода дифференцировать специфические нейрохимические сигналы от фоновых помех. В совокупности эти особенности определяют FSCV как незаменимый инструмент для изучения функциональной нейрохимии в контексте поведенческих и когнитивных процессов в естественных и экспериментальных условиях.

Принципы и реализация быстрой циклической вольтамперометрии

Методика быстрой сканирующей циклической вольтамперометрии представляет собой высокочувствительный электрохимический подход, предназначенный для изучения нейронной активности путем количественного определения концентраций моноаминовых нейротрансмиттеров – в первую очередь дофамина (DA) [3], серотонина (5-HT) и норадреналина (NE) – в биологических средах [4]. Особенно широкое применение данный метод находит в исследованиях центральной нервной системы млекопитающих, где он используется как в условиях *in vivo*, так и *in vitro*.

Суть метода заключается в регистрации вольтамперных характеристик, возникающих при быстром циклическом изменении потенциала на рабочем электроде (обычно в диапазоне от –0,4 до +1,3 В). При этом вещества, присутствующие во внеклеточной жидкости, подвергаются окислительно-восстановительным реакциям на поверхности электрода, что сопровождается генерацией измеряемого электрического тока, пропорционального их локальной концентрации (рис. 1). Ключевой особенностью FSCV является высокая скорость сканирования (сотни вольт в секунду), обеспечивающая временное разрешение порядка 100 мс (частота регистрации ~10 Гц). Такая точность позволяет фиксировать динамические кратковременные из-

менения нейромедиаторных концентраций, обусловленные поведенческими актами, фармакологическими вмешательствами или прямой электрической стимуляцией нейронных структур.

FSCV позволяет с высоким временным и пространственным разрешением отслеживать их высвобождение и концентрацию в мозге, используя быстрое сканирование с помощью системы электродов в диапазоне потенциалов (чаще – от –0,4 до 1,3 В) для регистрации вольтамперных кривых, которые затем анализируются для определения изменений концентрации веществ. Существует математический аппарат для преобразования показателей силы тока (ампер) в концентрацию вещества (молярность) с помощью калибровки и анализ формы пиков [5].

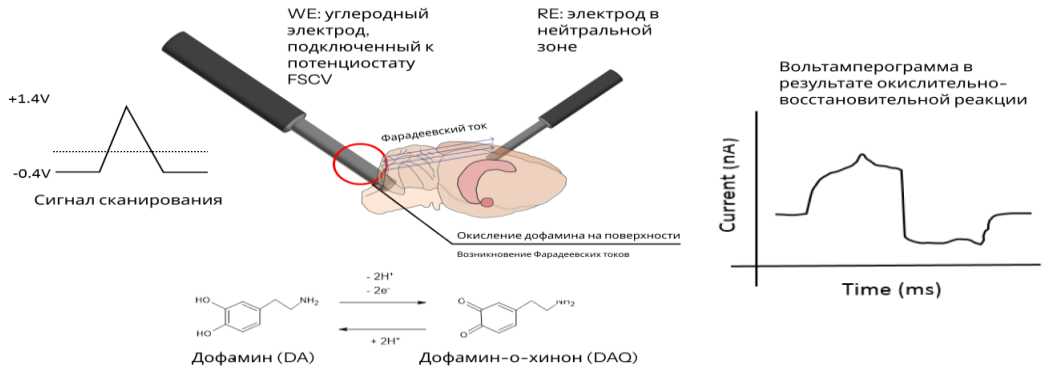


Рис. 1. Визуализация процесса FSCV на базе системы из двух электродов. Углеродный микроэлектрод помещен в головной мозг крысы. Хлорсеребряный микроэлектрод находится в более нейтральной зоне мозга, на расстоянии от первого микроэлектрода. Потенциостат генерирует треугольный сигнал сканирования. На поверхности углеродного электрода возникает окислительно-восстановительная реакция и между электродами возникают фарадеевские токи. Электрохимический процесс описывается вольтамперограммой, получаемой в результате FSCV

Система из двух электродов

Процесс быстрой сканирующей циклической вольтамперометрии реализуется посредством двухэлектродной микроэлектрохимической системы, имплантируемой в биологическую среду (рис. 1). Центральную роль в этой системе играет рабочий электрод (working electrode, WE), как правило, изготовленный из углеродного материала [6], на который подается быстро изменяющийся линейный потенциал – в виде треугольного или модифицированного импульса (рис. 2) – со скоростью сканирования, достигающей нескольких сотен вольт в секунду (например, 400 В/с) [7]. Потенциал

циклически варьируется в заданном диапазоне, обычно от –0,4 до +1,3 В, что обеспечивает последовательное окисление и восстановление электроактивных нейротрансмиттеров, присутствующих во внеклеточном пространстве.

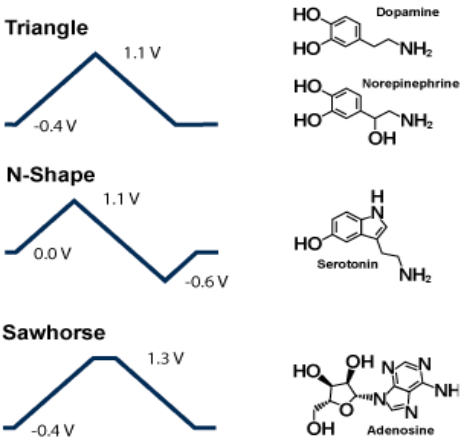


Рис. 2. Методика FSCV предполагает, что потенциостат способен генерировать сигналы разной формы. Это обусловлено уникальной электрохимической активностью молекул нейромедиаторов. Для детекции дофамина применяется классическая треугольная форма, обеспечивающая высокую чувствительность и воспроизводимость пиков при стандартных скоростях сканирования. Детекция серотонина требует подачи сигнала N-образной формы (или модифицированных импульсов). В случае сканирования с целью детекции аденозина оптимальным является сигнал типа Sawhorse (трапециевидная развертка с плато на пиковом потенциале)

Электрод сравнения (reference electrode, RE) обеспечивает стабильный и репродуцируемый потенциал, относительно которого контролируется напряжение на рабочем электроде. В условиях in vivo в качестве RE чаще всего применяется миниатюрный хлорсеребряный (Ag/AgCl) электрод, размещаемый в анатомически удаленной и функционально нейтральной зоне – например, в носовом синусе или над твердой мозговой оболочкой.

В теории также используют вспомогательный электрод (counter electrode, CE), который замыкает электрическую цепь, обеспечивая протекание тока, генерируемого в ходе электрохимических реакций на поверхности WE. CE, выполненный из инертного материала с большой площадью поверхности (обычно – платиновая проволока), компенсирует накопление заряда и способствует точному поддержанию заданного потенциала на рабочем электроде относительно RE. Однако стоит отметить, что на практике чаще используют двухэлектродную систему, состоящую из WE и RE [3]. В то же время CE применяют для in vitro или химии, так как in vivo им можно

пренебречь [6] из-за крайне незначительной величины токов, за отвод которого может быть ответственен RE вместе CE. При этом рамках настоящей статьи разобрана схема именно с двухэлектродной системой.

Таким образом, при имплантации в мозг модельного организма рабочий электрод выполняет функцию высокочувствительного сенсора: его позиционирование в различных нейронных структурах позволяет регистрировать локальные выбросы дофамина и других моноаминов [4]. Электрод сравнения, будучи фиксированным в стабильной ткани, создает необходимые электрохимические условия для корректной работы системы [6]. Функционирование FSCV-системы может быть описано четырьмя последовательными этапами: (1) приложение потенциала между WE и RE с помощью потенциостата [7]; (2) возникновение окислительно-восстановительной реакции (например, окисление дофамина при потенциале ~0,6 В), в ходе которой молекулы нейротрансмиттера отдают электроны рабочему электроду; (3) регистрация возникающего наноамперного тока, протекающего между WE и RE; (4) преобразование измеренного тока в количественные данные о концентрации нейромедиатора в реальном времени. Пример вольтамперограмм в результате сканирования треугольным сигналом в целях детекции дофамина представлен на рис. 3.

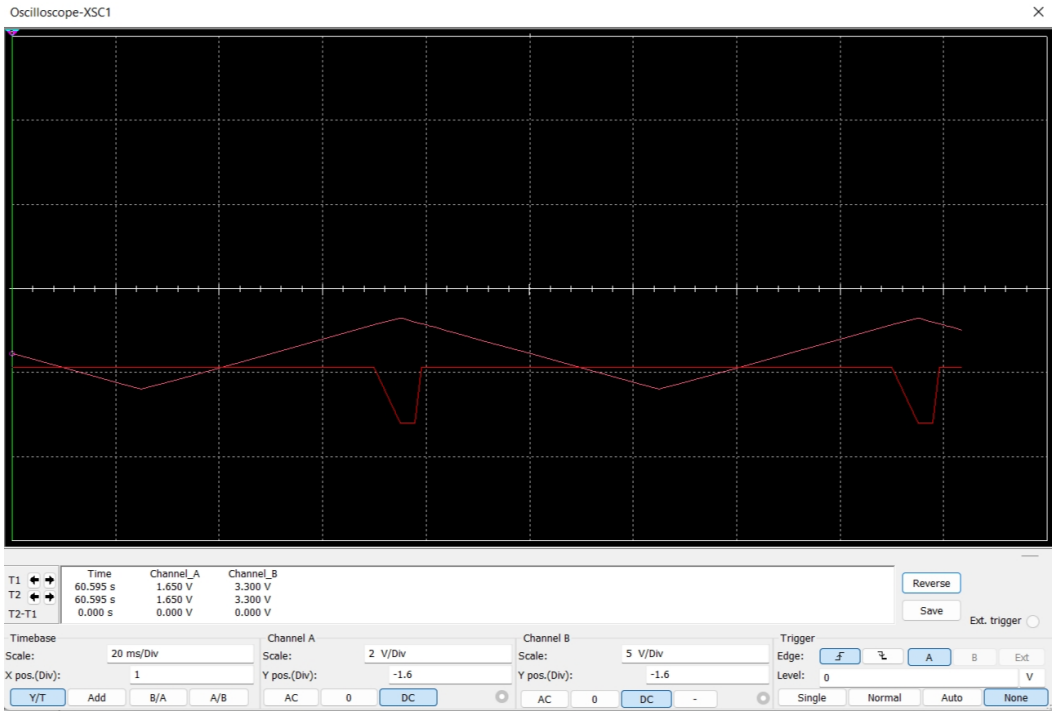


Рис. 3. Пример вольтамперограмм в результате сканирования треугольным сигналом в целях детекции дофамина

Потребность в разработке новых потенциостатов

При описании принципов функционирования методики быстрой сканирующей циклической вольтамперометрии, неизбежно возникают фундаментальные вопросы, связанные с ее практической реализацией в условиях, приближенных к естественным. Во-первых, возможно ли обеспечить регистрацию нейрохимических сигналов в рамках этологического подхода, когда модельный организм сохраняет свободу передвижения и находится в максимально естественной для лабораторных условий среде? Во-вторых, как достоверно зафиксировать крайне слабые электрохимические сигналы – наноамперные токи, генерируемые при окислении дофамина в тканях головного мозга, учитывая их малую амплитуду и возможные потери в биологической среде? И, наконец, допускает ли современная аппаратная база организацию удаленного управления процессом FSCV-измерений с использованием беспроводных технологий и программных интерфейсов?

В этом контексте необходимо найти и реализовать автономный потенциостат. При этом необходимо уделить особое внимание габаритным и массогабаритным характеристикам устройства: итоговая конструкция автономного потенциостата должна быть достаточно компактной для надежного размещения на спине лабораторной крысы (*R.norvegicus*). При этом масса устройства должна быть сведена к минимуму, чтобы не оказывать значимого влияния на естественное поведение животного и обеспечивать высокую этологическую валидность экспериментов [8]. Таким образом, разработка будет направлена на создание сбалансированного решения, сочетающего техническую функциональность, автономность, биосовместимость и минимальное вмешательство в поведенческие паттерны исследуемого организма.

Заключение

Представленный обзор демонстрирует необходимость в разработке автономного потенциостата для быстрой сканирующей циклической вольтамперометрии, ориентированного на применение в нейронаучных экспериментах *in vivo*. Модель устройства должна отвечать ключевым требованиям современной нейрофизиологии: обеспечивать высокую чувствительность регистрации наноамперных токов, связанных с окислением моноаминовых нейротрансмиттеров, сохранение естественного поведения модельного организма за счет миниатюризации и беспроводной передачи данных, а также

экономическая доступность компонентной базы, реализуемой в условиях российского рынка.

Список используемых источников

1. John, C. E., & Jones, S. R. Fast Scan Cyclic Voltammetry of Dopamine and Serotonin in Mouse Brain Slices // В A. C. Michael & L. M. Borland (Ред.). Electrochemical Methods for Neuroscience. CRC Press/Taylor & Francis, 2007. С. 105–120. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK2579/ (дата обращения: 16.03.2026).

2. Kang, Y., Goyal, A., Hwang, S., Park, C., Cho, H. U., Shin, H., Park, J., Bennet, K. E., Lee, K. H., Oh, Y., & Jang, D. P. Enhanced Dopamine Sensitivity Using Steered Fast-Scan Cyclic Voltammetry // ACS Omega. 2021. Т. 6, № 49. С. 33599–33606. DOI: 10.1021/acsomega.1c04475.

3. Bucher, E. S., & Wightman, R. M. Electrochemical Analysis of Neurotransmitters // Annual Review of Analytical Chemistry. 2015. Т. 8. С. 239–261. DOI: 10.1146/annurev-anchem-071114-040426.

4. Cho, W., Liu, F., Hendrix, A., McCray, B., Asrat, T., Connaughton, V., & Zestos, A. G. Timed Electrodeposition of PEDOT:Nafion onto Carbon Fiber-Microelectrodes Enhances Dopamine Detection in Zebrafish Retina // Journal of The Electrochemical Society. 2020. Т. 167, № 11. С. 115501. DOI: 10.1149/1945-7111/aba33d.

5. Kennedy, R. T. Emerging Trends in in Vivo Neurochemical Monitoring by Microdialysis // Current Opinion in Chemical Biology. 2013. Т. 17, № 5. DOI: 10.1016/j.cbpa.2013.06.012.

6. Castagnola, E., Lee, K. H., & Ricci, D. Editorial: Carbon Microelectrodes for Neurochemical Sensing // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. (б. д.). Т. 14. Ст. 1799334. DOI: 10.3389/fbioe.2026.1799334.

7. Cai, X., Xu, Z., Liu, J., Wang, R., & Wu, Y. Recent Advances in Intracortical Neural Interfaces for Freely Moving Animals: Technologies and Applications // Engineering. 2025. Т. 44. С. 73–86. DOI: 10.1016/j.eng.2024.12.012.

8. Jonkman, S., Kosaki, Y., Everitt, B. J., & Dickinson, A. The Role of Contextual Conditioning in the Effect of Reinforcer Devaluation on Instrumental Performance by Rats // Behavioural Processes. 2010. Т. 83, № 3. С. 276–281. DOI: 10.1016/j.beproc.2009.12.017.

DEVELOPMENT OF A CIRCUIT FOR A STANDALONE WIRELESS POTENTIOSTAT FOR FAST-SCAN CYCLIC VOLTAMMETRY BASED ON THE ESP32 MICROCONTROLLER

Adonin L., Efimenko V.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

This study presents the design of a cost-effective, ESP32-based standalone potentiostat for wireless fast-scan cyclic voltammetry (FSCV), facilitating unconstrained neurochemical monitoring in rodents. Simulation results confirm the circuit's viability for in vivo applications, while noting limitations in the ESP32's integrated DAC precision.

Key words: FSCV, potentiostat, microcontroller, operational amplifier, ESP32, lithium-ion battery, microelectrode, charge module

УДК 004.946
ГРНТИ 28.17.33

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОГО КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

С. В. Акимов, Г. В. Верхова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрена концепция киберфизического пространства постиндустриального общества, а также методологические принципы его построения. Показано, что киберфизическое пространство возникает как результат конвергенции Всемирной паутины и интернета вещей, опираясь на стремительное развитие иммерсивных технологий. В процессе формирования киберфизического пространства возникает отражение реального мира в киберпространстве, в результате чего происходит влияние обоих пространств друг на друга. Предложен понятийный аппарат методологии киберфизического пространства и подход к его реализации. Высказано предположение, что на смену цифровой трансформации придет интеллектуальная трансформация, за которой, в свою очередь, последует кибертрансформация.

децентрализация, интеллектуальная трансформация, агент, принципал, прокси-агент, контрагент, иммерсивные технологии, интернет вещей, конвергенция

В настоящим момент времени человечество находится в стадии перехода от индустриального общества к постиндустриальному, в котором главным ресурсом является информация и теоретическое знание, а ключевыми фигурами – ученые, преподаватели и высококвалифицированные специалисты [1-2]. Существует ошибочное мнение, что в постиндустриальном обществе, произойдет отказ от индустриальных предприятий, что не соответствует действительности, так как такое общество будет строиться на мощнейшей индустриальной базе, которая будет иметь максимальную степень автоматизации, и, как результат – существенное сокращение работников в данной сфере. Здесь наблюдается полная аналогия с переходом от аграрного общества к индустриальному, при котором процент населения, занятый в сельском хозяйстве сократился до минимума, в то время как производство сельхозпродукции значительно возросло.

Переход к постиндустриальному обществу требует цифровой, а также интеллектуальной трансформации всех сфер человеческой деятельности, для осуществления которых необходимо создание соответствующей инфраструктуры [3-7], которой станет киберфизическая среда, в рамках которой формируется киберфизическое пространство. Целью данной статьи явля-

ется изложение методологических основ проектирования единого киберфизического пространства постиндустриального общества.

Под киберфизической средой будем понимать совокупность технических и программных средств, обеспечивающих активное взаимодействие физических и юридических лиц, социальных групп и киберфизических систем. Киберфизическая система является совокупностью физических систем и их цифровых двойников. Киберпространство – отражение физического пространства в киберфизической среде, которое осуществляется по аналогии с теорией отражения, и, таким образом, реализуется взаимное влияние физического пространства и киберпространства друг на друга (рис. 1).

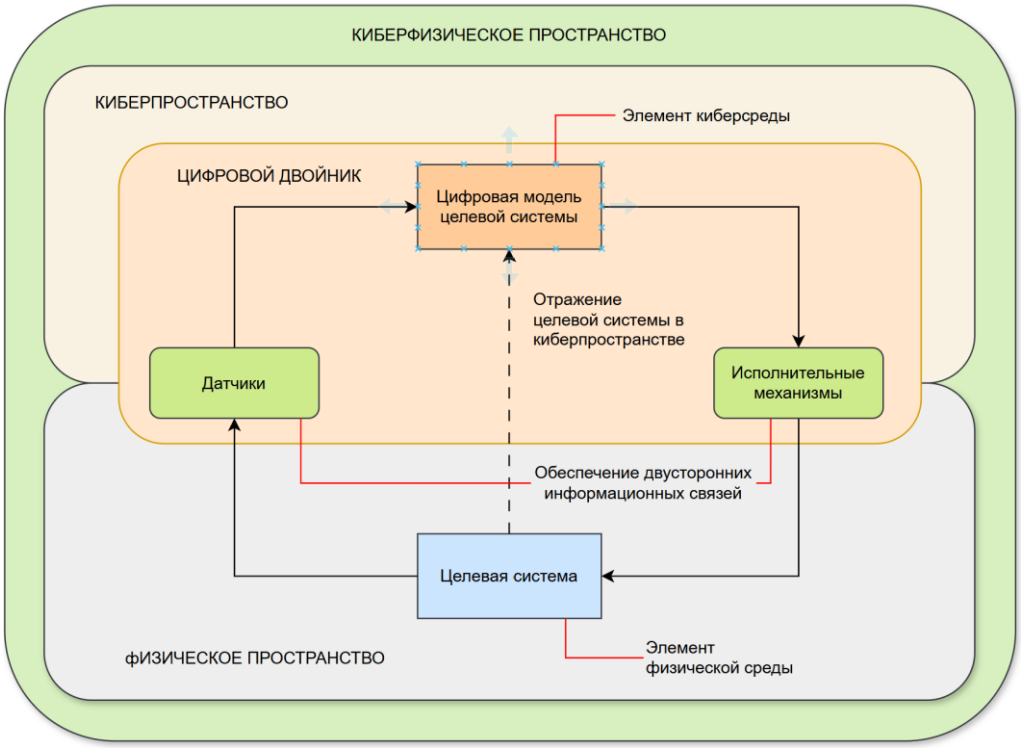


Рис. 1. Концепция киберфизического пространства

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 цифровой двойник объекта или системы определяется как система, состоящая из цифровой модели объекта или системы с установленными двусторонними информационными связями с целевым объектом или системой [8]. Таким образом, на рис. 1 цифровой двойник включает в себя цифровую модель, а также датчики (рефлекторы) и исполнительные механизмы (рефлекторы), обеспечивающие двустороннюю синхронизацию модели и целевой системы (целевого объекта). Учитывая, что цифровой двойник должен отражать различные стороны целевой системы, цифровая модель должна создаваться на базе методологии многоаспектного моделирования [9].

Киберфизическая среда, в рамках которой формируется киберфизическое пространство, учитывая ее глобальный характер, может быть создана только в децентрализованном формате, на базе мультиагентного подхода, путем объединения локальных киберсред. В раках предложенной концепции любая сущность является принципалом, который представлен в киберсреде агентом. В роли принципалов могут выступать физические и юридические лица, группы физических лиц, техногенные, природные и природно-техногенные системы. Данный подход обеспечивает единообразное информационное взаимодействие между агентами, вне зависимости от того, каких принципалов они представляют.

Агент в киберсреде может устанавливать различные отношения с другими агентами. Гибкость управления отношениями, возможность установления отношений и коммуникаций с агентами, вне зависимости от того, в какой локальной киберсреде они находятся, а также прозрачность межсредовой миграции обеспечивается путем создания прокси-агентов, составляющих окружение агента. Все информационные взаимодействия с другими агентами (контрагентами) осуществляется через прокси агентов, что обеспечивает высокий уровень интероперабельности (рис. 2).

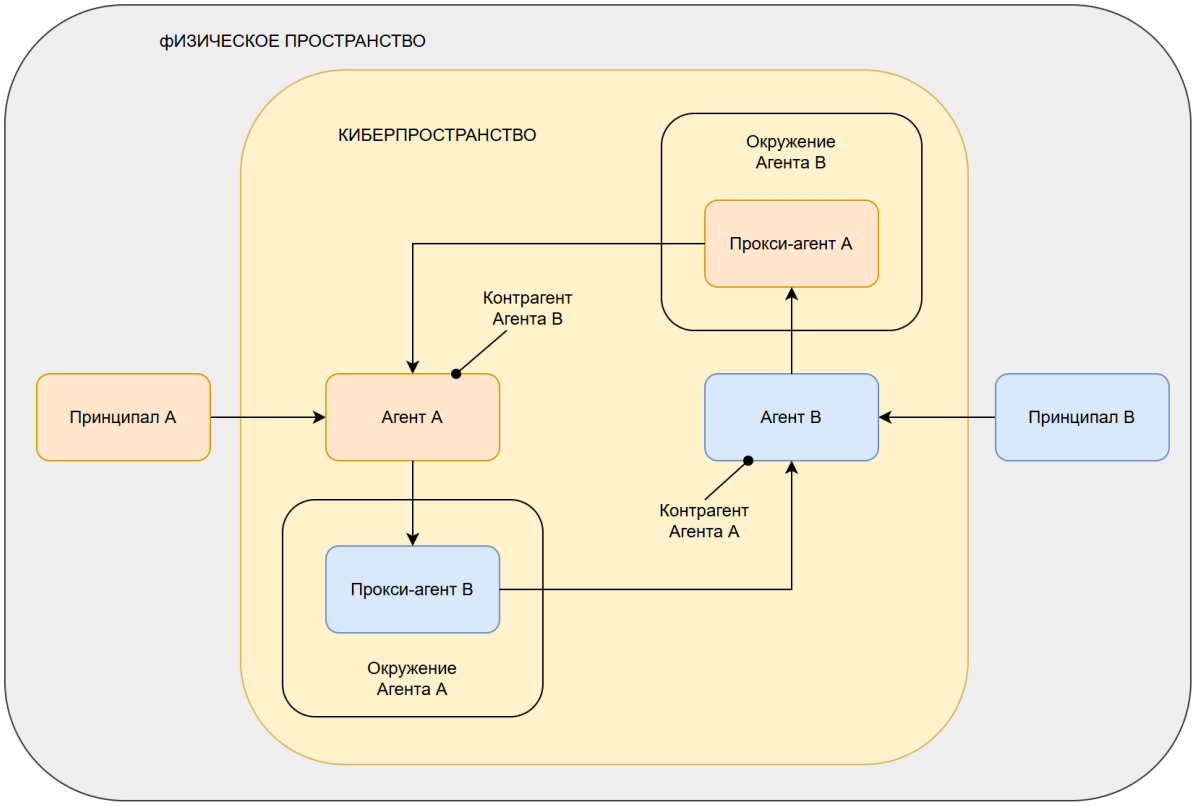


Рис. 2. Отношение принципалов, агентов и прокси-агентов

Агентно-ориентированная архитектура киберсреды обеспечивает возможность внедрения технологии искусственного интеллекта для установления информационных отношений между агентами с целью решения поставленных задач, например, формирования временных трудовых коллективов. Таким образом, формирование киберфизической среды постиндустриального общества станет основой для перехода от цифровой трансформации всех сфер человеческой деятельности к кибертрансформации.

Предложенные в статье методологические основы формирования единого киберфизического пространства постиндустриального общества:

– обеспечат формирование единой децентрализованной киберфизической среды – основы киберфизического пространства – из локальных интероперабельных киберсед;

– полностью соответствуют концепциями Web 3.0 и Web 4.0;

– позволяют обобщить понятие метавселенной, представляющей социально-цифровое пространство, на киберфизическое пространство, представляющее собой социо-техногенное киберпространство;

– вводят триаду принципал – агент – цифровой двойник, обеспечивающую единообразный подход к интеграции в единое киберфизическое пространство физических и юридических лиц, техногенных, природных и природно-техногенных объектов.

Список используемых источников

1. Белл Д. Грядущее постиндустриальное общество. М.: Академия, 1999. 788 с.

2. Карпикова А. Ю. Понятие «сетевое общество» в контексте теорий «постиндустриального» и «информационного» обществ // Вопросы политологии. 2025. Т. 15. № 1 (113). С. 24-27.

3. Mokudai T., Schröder M., Holst H. Industry 4.0 and lean augmentation Digital transformation in the German and Japanese automotive industry // International Journal of Automotive Technology & Management. 2024. Т. 24. № 6.

4. Keay A. RAS Industry Activities Board Global Robotics Industry Funding Report: An Introduction [Industry Activities] // IEEE Robotics and Automation Magazine. 2025. Т. 32. № 4. С. 116-117.

5. Verkhova G. V., Akimov S.V. The role of the unified educational cyber environment in improving the quality of training of engineer personnel // В сборнике: Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES). 2018. С. 70-74.

6. May M. C., Glatter D., Arnold D., Pfeffer D., Lanza G. IIOT system canvas – from architecture patterns towards an iiot development framework // Journal of Manufacturing Systems. 2024. Т. 72. С. 437-459.

7. Liu Zh., Davoli F., Borsatti D. Industrial Internet of Things (IIoT): Trends and Technologies // Future Internet. 2025. Т. 17. № 5. С. 213.

8. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021.

9. Акимов С. В., Меткин Н. П. Архитектура среды многоаспектного моделирования для автоматизации решения задач исследования, проектирования и управления // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 1. № 1. С. 32-40.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE FORMATION OF A UNIFIED CYBER-PHYSICAL SPACE

Akimov S., Verkhova G.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the concept of cyber-physical space in post-industrial society, as well as the methodological principles for its construction. It demonstrates that cyber-physical space is emerging as a result of the convergence of the World Wide Web and the Internet of Things, building on the rapid development of immersive technologies. As cyber-physical space develops, the real world is reflected in cyberspace, resulting in mutual influence between the two spaces. A conceptual framework for a cyber-physical space methodology and an approach to its implementation are proposed. It is suggested that digital transformation will be replaced by intellectual transformation, which, in turn, will be followed by cybertransformation.

Key words: decentralization, intelligent transformation, agent, principal, proxy agent, counterparty, immersive technologies, internet of things, convergence

УДК 621.396.962.23
ГРНТИ 47.49.29

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ МИКРОДОПЛЕРОВСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ БПЛА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ ДЛЯ СИСТЕМ 5G NR

Р. А. Алли, К. О. Коровин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Разработана математическая модель сигнала для систем совмещенной радиолокации и связи, использующих широкополосные сигналы системы связи 5-го поколения. Моделируется аналитический, в пределах одного символа ортогонального частотного мультиплексирования, сигнал для обеспечения возможности фильтрации импульсных помех алгоритмом рекурсивного проецированного компрессивного восстановления и дальнейшей обработке при помощи алгоритмов сверхразрешения, в частности семейства методов оценки параметров сигнала на основе инвариантности пространств. Отраженный радиолокационный сигнал представлен в виде аналитической функции, учитывающей многолучевое распространение, допплеровское смещение и микродоплеровскую модуляцию, возникающую при отражении от вращающихся элементов беспилотных летательных аппаратов.

ISAC, JCAS, ESPRIT, микродоплеровский эффект, БПЛА, Meta-ESPRIT, сверхразрешение, микродоплеровские признаки, MUSIC, угловое разрешение, доплеровская локация, SVD-разложение, tensor-ESPRIT, тензорные методы

1. Введение

Системы совмещенной радиолокации и связи (Integrated Sensing and Communication, ISAC) – это передовая технология сетей связи 5-го и 6-го поколения, позволяющая объединить функциональность приемо-передающего устройства и радиолокатора в телекоммуникационной инфраструктуре [1, 2].

Широкое распространение малых беспилотных летательных аппаратов привело к необходимости оперативно обнаруживать и сопровождать их в городской черте, что превратило технологию совмещенной радиолокации и связи в чрезвычайно перспективный инструмент для решения задач малой беспилотной авиации. Однако, малый размер, микродоплер [3], приводящий к дисперсии отраженного сигнала при недостаточной дискретизации по времени и иные конструктивные особенности, например диэлектрический кор-

пус, уменьшающий ЭПР, сделали методы сверхразрешения перспективным инструментом для работы с данным типом летательных аппаратов.

Для оценки параметров движения применяются алгоритмы сверхразрешения: MUSIC, ESPRIT, MVDR [4] однако, в присутствии импульсных помех или многолучевого распространения сигнала, в том числе когерентных сигналов [5], они теряют свою работоспособность, из-за чего требуется предварительное выделение полезной компоненты.

Эффективным решением является разделение сигнала по модели «низкоранговая + разреженная компонента» с помощью онлайн версии Robust PCA – ReProCS (Recursive Projected Compressive Sensing) [6, 7]. Эти методы отделяют низкоранговую компоненту (доплеровское смещение сигнала, вызванное движением цели) от разреженных возмущений (импульсные помехи).

Цель работы – разработка аналитической модели отраженного OFDM-сигнала, пригодной для тензорной обработки и алгоритмов сверхразрешения.

Основные особенности модели:

– полезный сигнал задан в аналитической форме, удобной для спектрального анализа;
– учтены многолучевое распространение, доплеровское смещение и микродоплеровская модуляция;
– структура данных допускает естественное тензорное представление и разложение Такера.

2. Математическая модель зондирующего сигнала

Описание зондирующего сигнала для одного символа возьмем из стандарта 3GPP TS 38.211 [8].

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} a_k e^{j2\pi f_k t}, 0 \le t \le T_{sym,}$$

где a_k – комплексные QAM символы, $fk = fc + k\Delta f$ – частоты и m-м OFDM-символе, Δf – шаг поднесущих, K – число поднесущих.

Такие символы можно представить в виде временного ряда. Таким образом помимо поднесущих у нас появляется еще одно измерение – еще одна сумма:

$$s_m(t) = s(t) \cdot e^{-j2\pi f_k \tau_m}$$

Структура сигнала формирует трехмерный тензор наблюдений X(m,k,q), где m – пространственное измерение (антенны), k – частотное (поднесущие), q – временное (OFDM-символы).

3. Математическая модель отраженного сигнала

Допустим, цель находится на дальности:

$$R(t) = R_0 + vt + \frac{L}{2} cos\,\varphi \cdot cos(2\pi f_r t),$$

где v – радиальная скорость цели, L – длина лопасти, f_r – частота вращения ротора, φ– угол ориентации лопасти относительно линии визирования (отличен от DOA θ).

Задержка рассчитывается следующим образом:

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c}$$

А отраженный сигнал на m-м элементе:

$$y_m(t) = \beta s(t - \tau(t) - \tau_m)$$

где: β – коэффициент отражения, $\tau_m = \frac{dm\,sin\theta}{c}$

После OFDM-демодуляции, то есть удаления циклического префикса и БПФ, получаем оценку канального коэффициента:

$$\hat{a}_{k,q,m} = a_{k,q} H_{k,q,m}$$

После этого можно разложить канальный коэффициент на множители:

$$H_{k,q,m} = \beta e^{-j2\pi f_k \tau_0} e^{-j2\pi f_D q T_{sym}} e^{-j2\pi f_k \frac{dm\,sin\theta}{c}} e^{-j2\pi f_k \tau_{micro}(q)}$$

где u_m – пространственный вектор направляющих коэффициентов (вектор фазирования), $v_k = e^{-j2\pi f_k \tau_0}$ – частотный (дальность), $w_q = e^{-j2\pi f_D q T_{sym}}$ – временной (доплер).

Тензор наблюдений представим в виде суммы рангов-1 компонент:

$$X = \sum_{i=1}^{r} u_i \otimes v_i \otimes w_i,$$

где r – число целей. Таким образом тензор обладает низким рангом, а многолучевое распространение добавляет линейно независимые компоненты, несущественно увеличивая ранг.

Разложение выше является частным случаем разложения Такера с диагональным ядром [8] $G \in \mathbb{C}^{r \times r \times r}$:

$$X = G \times_1 U^{(1)} \times_2 U^{(2)} \times_3 U^{(3)}$$

где $G_{i,i,i} = \beta_i$(остальные элементы нулевые), а столбцы матриц $U^{(n)}$ – векторы u_i, v_i, w_i.

При наличии микродоплеровских модуляций структура выглядит следующим образом:

$$X = L + S,$$

где L – низкоранговая компонента (стационарные отражения + основное допплеровское смещение, вызванное перемещением цели), S – разреженная компонента (микродоплеровская модуляция + импульсные помехи). Так как такая модель сводится к задаче разделения тензора на плотную и разреженную компоненты, она может быть решена при помощи разложения Такера, с последующим применением результатов этого разложения в алгоритмах ReProCS и тензорном ESPRIT [9, 10]. Более того, решение этой задачи позволяет снизить объем предаваемой и обрабатываемой далее информации далее по тракту, так как $r << min\,(M, K, Q)$, что означает, что у нас после разложения в место большого трехмерного тензора остается небольшое ядро этого тензора со стороной r и три матрицы-проекции M, K и Q, что в зависимости от размера входного тензора данных, может значительно ускорить обработку сигнала.

4. Компьютерное моделирование сигнала

На языке Python была реализована компьютерная модель сигнала, в точности повторяющая описанный в статье алгоритм генерации. Сигнал излучается одной антенной со следующими параметрами:

- 72 поднесущих
- 14 OFDM символов
- Δf = 30кГц (смещение по частоте между поднесущими)

Далее сигнал отражается от БПЛА с одним винтом и 4 лопастями, моделируемыми 10 точечными отражателями на лопасть и помимо прямого распространения, проходит еще тремя траекториями. БПЛА находится от локатора на расстоянии 100 метров и летит со скоростью 10 м/с, вращая винтом с частотой в 50 Гц (модельный случай). Отраженный сигнал принимается 8 элементной линейной антенной решеткой. В результате моделиро-

вания можно построить спектрограмму отраженного сигнала, как на рисунке 1а, которая может быть проанализирована в том числе с помощью нейронных сетей, но требует подбора длительности зондирующего импульса под скорость вращения винта БПЛА, для получения интерпретируемой спектрограммы что, применимо в ЛЧМ радиолокаторах [10], но весьма проблематично в системах совмещенной радиолокации и связи. Также можно отметить крайне неравномерное распределение мощности по антеннам, вызванное разницей фазы сигнала.

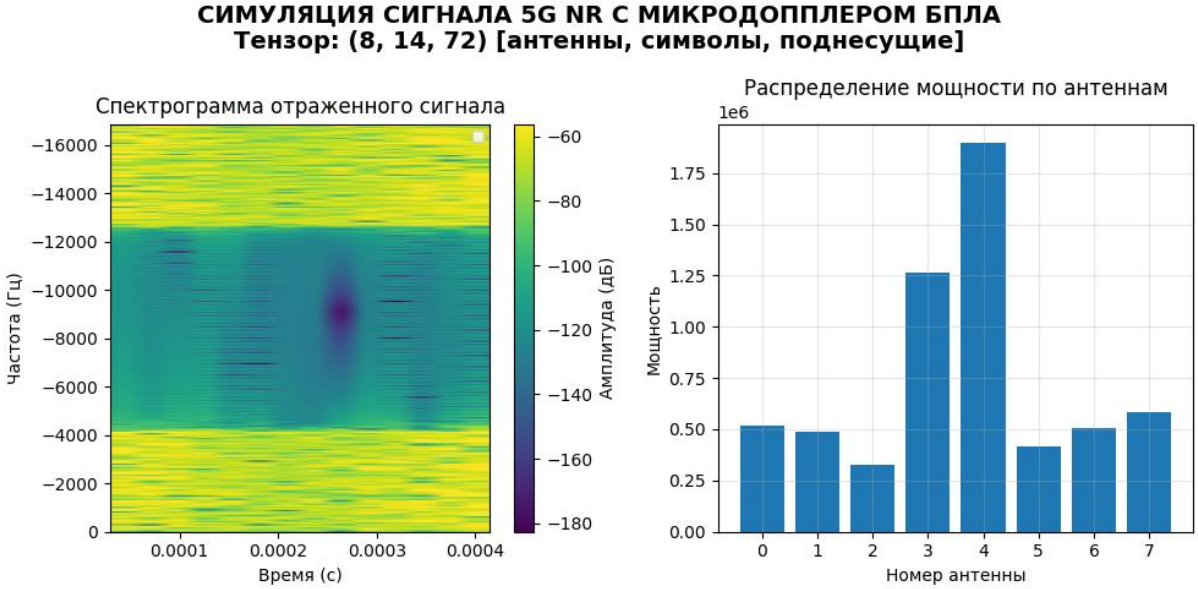


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования (а) – спектрограмма отраженного сигнала, (б) – распределение мощности по антеннам

Выводы

Разработана модель сигнала на основе спецификации 3GPP TS 38.211, позволяющая получить физически корректную модель сигнала, подлежащую анализу при помощи алгоритмов, использующих разложение Такера, что открывает значительные возможности по внедрению алгоритмов сверхразрешения. Также, благодаря применению разложения Такера на ранних этапах обработки, снижаются требования к интерфейсам передачи данных в тракте анализа сигнала, за счет сжатия данных.

Список используемых источников

1. Liu F. и др. Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2022. Т. 40. № 6. С. 1728–1767.
2. Zhang J. A. и др. An Overview of Signal Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing // IEEE J. Sel. Topics Signal Process. 2021. Т. 15. № 6. С. 1295–1315.
3. Chen V. C. The Micro-Doppler Effect in Radar. 2nd ed. Artech House, 2019.
4. Roy R., Kailath T. ESPRIT – Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process. 1989. Т. 37. № 7. С. 984–995.
5. Shan T. J. и др. On Spatial Smoothing for Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signals // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process. 1985. Т. 33. № 4. С. 806–811.
6. Vaswani N. Recursive Projected Compressive Sensing (ReProCS) // IEEE Trans. Signal Process. 2013. Т. 61. № 5. С. 1142–1156.
7. Candes E. J., Romberg. J., Tao. T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. Т. 52. № 2. С. 489–509.
8. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation. V. 17.0.0, 2022.
9. De Lathauwer L. и др. A Multilinear Singular Value Decomposition // SIAM J. Matrix Anal. Appl. 2000. Т. 21. № 4. С. 1253–1278.
10. Liu W. и др. Robust Tensor ESPRIT for multidimensional parameter estimation // IEEE Trans. Signal Process. 2020. Т. 68. С. 1234–1247.

MODEL AND ALGORITHMS FOR MICRO-DOPPLER RADAR DETECTION OF UAVS IN URBAN ENVIRONMENTS FOR 5G SYSTEMS

Alli R., Korovin. K.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

A mathematical model of the signal has been developed for integrated sensing and communication (ISAC) systems that utilize wideband signals of the 5th-generation (5G) communication standard. An analytical signal within one Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) symbol is modeled to enable the filtering of impulse noise using the Recursive Projected Compressive Sensing (ReProCS) algorithm and subsequent processing by super-resolution algorithms, in particular, the family of methods for estimating signal parameters based on rotational invariance techniques. The reflected radar signal is represented as an analytical function that takes into account multipath propagation, Doppler shift, and micro-Doppler modulation arising from reflections off the rotating elements of unmanned aerial vehicles (UAVs).

Key words: ISAC, MIMO, 5G NR, micro-Doppler effect, UAV, CNN, ViT, ISAC, JCAS, ESPRIT, microdoppler effect, UAV, Meta-ESPRIT, superresolution, microdoppler features, MUSIC, angle resolution, doppler radiolocation, SVD-decomposition, tensor-ESPRIT, tensor methods

УДК 621.39
ГРНТИ 49.43.29

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ СОВМЕЩЕННОЙ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ (ISAC) В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ГЛУБОКИМ ОБУЧЕНИЕМ

М. В. Антропов[1], А. Г. Владыко[1], А. Л. Долгополов[2], В. С. Усс[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
[2]ОАО «Ровер»

Проектирование систем совмещенной радиолокации и связи в мультиагентных робототехнических системах представляет собой комплексную и сложную задачу. В работе приведены основные программно-аппаратные проблемы при проектировании таких систем и способы их решения. Так же для решения указанных проблем все больше используются нейронные сети глубокого обучения. В работе рассмотрены проблемы глубоких нейронных сетей, возникающие при проектировании совмещенных радиолокационно-коммуникационных систем, и пути их преодоления.

совмещенная радиолокация и связь, ISAC, мультиагентные робототехнические системы, нейронные сети, глубокое обучение

Современные мультиагентные робототехнические системы, способные формировать плотные группы (рои) роботов, открывают новые возможности в таких задачах, как распределенное наблюдение, картографирование, охрана протяженных объектов. Однако их эффективность ограничивается конфликтом ресурсов в радиочастотном диапазоне. Традиционный подход, при котором для управления используются одни отдельные системы связи, а для навигации и предотвращения столкновений другие отдельные радиолокационные датчики, приводит к перегрузке спектра, увеличению массы, стоимости и энергопотребления аппаратуры.

Ответом на эти проблемы является парадигма совмещенных радиолокационно-коммуникационных систем (СРКС), известная как Integrated Sensing and Communications (ISAC). Ее ключевая идея заключается в использовании единого аппаратного комплекса и единого сигнала для одновременного решения задач высокоскоростной связи и радиолокации. Такой подход радикально снижает нагрузку на радиочастотный спектр и общее энергопотребление системы и позволяет значительно минимизировать аппаратную часть, что критически важно для малогабаритных роботов.

В настоящее время системы ISAC активно разрабатываются для шестого поколения мобильной связи (6G), технологии обмена данными в транспортной системе (V2X) и Интернета вещей (IoT). Однако для успешной реализации ISAC в робототехнических комплексах необходимо преодолеть ряд сложных технических проблем. Основные проблемы, возникающие при проектировании СРКС, и способы их решения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные проблемы проектирования ISAC

№ п/п	Проблема проектирования	Способ решения
1	Проблема совместного оптимального динамического распределения ресурсов	строгое разделение времени на радиолокационные и коммуникационные интервалы; совместное использование радиолокационных и коммуникационных ресурсов
2	Проблема выбора и проектирования сигналов	приоритет радиолокационной функции или функции связи в системе совместного радиолокационного и коммуникационного зондирования; проектирование двухфункциональных СРКС
3	Проблема собственных помех	аналоговое и цифровое подавление; использование новых материалов для антенн; увеличение пассивной изоляции между приемной и передающей антеннами.
4	Проблема оптимизации диаграмм направленности антенных решеток	формирование диаграмм направленности, одновременно отвечающих радиолокационным и коммуникационным целям
5	Проблема информационной безопасности	обеспечение устойчивости к комбинированным атакам и сохранение конфиденциальности данных зондирования

В последнее время, для решения проблем, изложенных в таблице 1, все больше используются методы глубокого обучения (ГО) на основе глубоких нейронных сетей (ГНС) [1], обученные тремя стратегиями обучения: с учителем, самообучением, обучением с подкреплением.

Несмотря на то, что технологии, основанные на ГО, могут значительно повысить эффективность систем ISAC существуют сложные нерешенные проблемы в этой области.

Проблемы ГНС:

– проблема данных. Обучение моделей ISAC, реализованных на ГНС, требует больших репрезентативных данных, охватывающих все многообразие режимов работы, состояний каналов связи и помехово-целевой обстановки. Традиционные пути их получения – это натурные измерения, что как правило оказывается трудоемким и дорогостоящим, и создает, так называемый, «информационный голод» для алгоритмов [2]. Решить эту проблему отчасти позволяют современные генеративные подходы, такие как состязательные сети (Generative Adversarial Network, GAN), способные синтезировать реалистичные данные [2,3]. Также решением проблемы может быть создание высокоточных «цифровых двойников» системы, которые позволят проводить виртуальные эксперименты в неограниченном количестве сценариев, что, однако является вычислительно затратным.

– проблема архитектурной сложности. Хотя ГНС демонстрируют в некоторых случаях почти оптимальные результаты, их архитектурная сложность зачастую становится непомерно высокой. Это приводит к экспоненциальному росту требований к вычислительным ресурсам на этапах обучения и эксплуатации, особенно в условиях мобильных систем с ограниченной энергоэффективностью. Поэтому, особенно для мобильных систем, приходиться применять ряд методов оптимизации таких моделей. Это метод дистилляции знаний («обучить» компактную сеть на основе большой) [4], методы нейросетевого сжатия за счет квантования и прунинга [5,6], выбор специализированных, изначально эффективных архитектур, таких как MobileNet или EfficientNet [7].

– проблема «черного ящика». ГНС известны своей непрозрачностью, из-за которой процесс принятия решений сложно поддается анализу, а поведение в нештатных ситуациях может быть непредсказуемым. Для критически важных инфраструктур, каковыми являются ISAC, это недопустимо. Для повышения доверия и надежности активно исследуются методы объяснимого искусственного интеллекта (eXplainable Artificial Intelligence, XAI), такие как LIME[1], SHAP[2] и сети Колмогорова-Арнольда (Kolmogorov-Arnold Networks, KAN). Эти методы позволяют интерпретировать предсказания модели, выделяя наиболее значимые входные признаки [8]. Другим пер-

[1] LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) – локально интерпретируемое не зависящее от модели объяснение

[2] SHAP (SHapley Additive exPlanations) – метод объяснения индивидуальных прогнозов

спективным путем является разработка гибридных систем, где ГО работает в тандеме с аналитическими алгоритмами, основанными на известной физике процессов. Такой симбиоз гарантирует более высокую надежность и интерпретируемость конечного решения.

– проблема адаптивности. Традиционные модели ГО статичны. Они оптимальны для условий, идентичных обучающей выборке, но теряют эффективность в быстро меняющейся операционной обстановке ISAC. Ключ к преодолению этой ригидности – переход к парадигме непрерывного обучения. Методы обучения с подкреплением позволяют системе адаптироваться в реальном времени, а мета-обучение наделяет ее способностью быстро осваивать новые задачи на основе ограниченного опыта, обеспечивая необходимую гибкость и масштабируемость.

– проблема реального времени. Развертывание моделей в условиях жестких ограничений по вычислительным ресурсам и задержкам требует особого подхода. Помимо сжатия моделей, перспективной является стратегия распределенного вычисления, когда часть расчетов производится на мощном удаленном сервере, а финальные – непосредственно на устройстве. Это позволяет использовать всю мощь сложных моделей, не нарушая требований к времени отклика.

– проблема безопасного сетевого взаимодействия. Сети ISAC по своей природе распределены и требуют кооперации между базовыми станциями для минимизации интерференции и решения общих задач. Однако совместное обучение моделей не должно ставить под угрозу конфиденциальность данных зондирования и коммуникации. Здесь на первый план выходит федеративное обучение, при котором участники обмениваются не сырыми данными, а параметрами моделей. Для дополнительного укрепления безопасности применяются методы дифференциальной приватности, гарантирующие, что по обновлениям модели невозможно восстановить исходные данные, и блокчейн-технологии, обеспечивающие доверие и отслеживаемость вклада каждого участника [9].

Таким образом, успешное решение обозначенных проблем, связанных с глубокими нейронными сетями, при проектировании ISAC в мультиагентных робототехнических системах может привести к значительным улучшениям в эффективности и функциональности таких систем.

Список используемых источников

1. Salem H., Sadia H., Quamar MD M., Magad A., Elrashidy M., Saeed N., Masood M. Data-driven integrated sensing and communication: Recent advances, challenges, and future prospects // ICT Express. 2025. Vol. 11. № 4. PP. 790–808. DOI: 10.1016/j.icte.2025.06.010.
2. Truong T., Yanushkevich S. Generative Adversarial Network for Radar Signal Synthesis // 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8851887.
3. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., [et al.]. Generative Adversarial Nets // NIPS 2014: Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2014. Vol. 2. PP. 2672–2680.
4. Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the Knowledge in a Neural Network // NIPS 2015: Deep Learning and Representation Learning Workshop. DOI: 10.48550/arXiv.1503.02531.
5. Krishnamoorthi R. Quantizing deep convolutional networks for efficient inference: A whitepaper. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1806.08342.
6. Han S., Pool J., Tran J., [et al.]. Learning both Weights and Connections for Efficient Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1506.02626.
7. Tan M., Le Q. V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, Long Beach, California, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1905.11946.
8. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. «Why Should I Trust You?»: Explaining the Predictions of Any Classifier // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1602.04938.
9. McMahan H. B., Moore E., Ramage D., [et al.]. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data // Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 2017. JMLR: W&CP, Vol. 54. DOI: 10.48550/arXiv.1602.05629.

Статья представлена научным руководителем, и.о. заведующего кафедрой САР СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом В. С. Уссом.

DESIGN CHALLENGES OF INTEGRATED SENSING AND COMMUNICATIONS (ISAC) SYSTEMS IN MULTI-AGENT ROBOTIC SYSTEMS USING DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS

Antropov M., Vladyko A., Dolgopolov A., Uss V.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

Designing integrated radar and communication systems in multi-agent robotic systems is a complex and challenging task. This paper presents the main software and hardware challenges in designing such systems and approaches to addressing them. Deep learning neural networks are also increasingly being used to address these challenges. This paper examines the challenges of deep neural networks that arise when designing integrated radar and communication systems and ways to overcome them.

Key words: integrated radar and communication, ISAC, multi-agent robotic systems, neural networks, deep learning

УДК 548.1:004.8
ГРНТИ 29.19.22

ОБЗОР УСПЕШНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РАСЧЕТЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

А. И. Арсирий, Т. А. Рыжикова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлен обзор методов расчета параметров кристаллических решеток – от экспериментальных до квантово-химических. Рассмотрены классические аналитические подходы (уравнения Борна – Ланде, Борна – Майера, Капустинского, метод межатомных потенциалов) и квантово-химические методы (теория функционала плотности, метод Хартри –Фока, гибридные функционалы). На примере титаната бария проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений ширины запрещенной зоны и параметра кристаллической решетки. Показана перспективность применения систем искусственного интеллекта в качестве экспертного инструмента при выборе оптимальной методологии расчета. Установлено, что рекомендация системы искусственного интеллекта позволила получить результаты с отклонением от экспериментальных данных менее 0,5 %.

кристаллическая решетка, энергия решетки, теория функционала плотности, метод Хартри – Фока, гибридные функционалы, искусственный интеллект, титанат бария, квантово-химические методы

Кристаллическое состояние вещества в современных технологиях

Кристаллическое состояние вещества обладает рядом эксплуатационных преимуществ, определяющих его широкое применение в современной электронике и промышленности. В отличие от аморфных материалов, кристаллы характеризуются строгой периодичностью атомной структуры, которая формирует уникальные электрофизические свойства: высокую подвижность носителей заряда, стабильность и воспроизводимость параметров, возможность направленного легирования для создания p-n-переходов, а также анизотропию электрических, тепловых и оптических свойств. Последнее обстоятельство используется при создании специализированных подложек, датчиков и устройств силовой электроники.

Важнейшей характеристикой кристаллической решетки, определяющей возможность применения материала в конкретной области технологии, является энергия решетки – энергия, высвобождающаяся при образовании

одного моля кристаллического твердого вещества из свободных ионов (или молекул) в газовой фазе. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями энергии решетки служит индикатором сложности межатомных взаимодействий.

Экспериментальные методы определения энергии кристаллической решетки

Для определения величины энергии кристаллической решетки применяются несколько экспериментальных методов. *Цикл Борна-Габера* является основным и наиболее распространенным; он базируется на законе Гесса [1]. *Калориметрический метод (цикл растворения)* основан на сравнении энергии растворения кристаллического вещества и энергии растворения газообразных ионов в одном и том же растворителе [2]. *Метод масс-спектрометрии высокого давления (эффузия Кнудсена)* позволяет напрямую изучать равновесие между твердой фазой и паром: на основе температурной зависимости давления пара рассчитываются энтальпия сублимации и энергия разрушения решетки до ионного состояния [3]. *Рентгеноструктурный анализ и анализ электронной плотности* – прецизионные измерения, позволяющие построить карту распределения электронной плотности в кристалле; особый интерес метод представляет при необходимости уточнить вклад ионной и ковалентной составляющих в энергию связи [4].

Сравнительная характеристика экспериментальных методов приведена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная характеристика экспериментальных методов

Метод	Что измеряется	Преимущества	Недостатки
Цикл Борна – Габера	Тепловые эффекты реакций	Высокая точность, признанный эталон	Требует большого объема справочных данных
Растворение (калориметрия)	Энтальпия растворения	Простота калориметрии	Требуются точные данные по гидратации ионов
Эффузия Кнудсена	Давление паров ионов	Прямое изучение связи	Сложное оборудование, высокие температуры
Рентгеноструктурный анализ	Расположение атомов в пространстве	Возможность изучения веществ со сложным строением	Сложное оборудование, высококвалифицированный персонал

Расчетные методы

Расчетные методы делятся на две большие группы: классические, основанные на электростатических моделях и эмпирических потенциалах, и квантово-химические, основанные на решении уравнения Шредингера для электронной плотности.

Уравнение Борна-Ланде представляет собой первую серьезную попытку математически описать решетку: метод учитывает баланс между кулоновским притяжением и электронным отталкиванием. Развитием этого подхода является *уравнение Борна-Майера*, позволяющее также описать сжимаемость кристаллов. Достоинством метода является возможность понять физику процесса, недостатком – необходимость знания типа структуры (константы Маделунга) и показателя Борна [5].

Уравнение Капустинского – наиболее универсальный из «быстрых» методов: энергия рассчитывается исходя только из ионных радиусов без привязки к конкретной геометрии решетки. Метод не требует знания структуры, однако имеет существенный недостаток – погрешность около 5–7 % [6].

Метод межатомных потенциалов (метод силовых полей) применяется в молекулярной динамике и статическом моделировании решеток. Для различных задач используются потенциалы Леннард-Джонса или Букингема – при моделировании дефектов, расчете поверхностной энергии и поведения материалов под давлением [5].

Квантово-химические методы являются наиболее точными и реализованы в программных пакетах (Gaussian, VASP, Quantum ESPRESSO, CRYSTAL [7]). В отличие от классических методов, они не используют эмпирических констант, поскольку рассчитывают распределение электронной плотности напрямую.

Теория функционала плотности (ТФП) – наиболее популярный расчетный метод. Вместо поиска волновой функции каждой частицы он ищет общую электронную плотность системы, что позволяет учесть ковалентную составляющую химической связи в сложных кристаллических структурах. Основной недостаток – сложность подбора функционала [8].

Метод Хартри-Фока – классический квантовый метод, редко применяемый для кристаллов в чистом виде. Как правило, он используется в комбинации с теорией функционала плотности в виде гибридных функционалов, поскольку в чистом виде не учитывает электронную корреляцию [9].

Методы высокого уровня – *теория возмущений Меллера-Плессета* второго порядка и кластерные разложения с включением одиночных, двойных и тройных возбуждений – обеспечивают наивысшую точность результатов, практически полностью совпадающих с экспериментальными данными. Однако эти методы требуют значительных вычислительных ресурсов и применяются преимущественно для малых ячеек [10].

Применение периодических граничных условий является основой программных пакетов типа Gaussian при расчете кристаллов: вместо расчета тысяч атомов программа рассчитывает одну элементарную ячейку и математически воспроизводит ее в трех измерениях, что позволяет получить энергию бесконечного кристалла.

В отличие от программных методов, моделирующих «идеальный» кристалл при температуре 0 К, экспериментальные методы учитывают реальное состояние вещества: наличие дефектов, примесей и тепловых колебаний. Поэтому сравнение данных цикла Борна-Габера с результатами расчетов методом теории функционала плотности является наилучшим способом верификации теоретических моделей в физике твердого тела.

Пример расчета параметров кристаллической решетки титаната бария

В качестве примера для расчета искусственному интеллекту (ИИ) была предложена решетка титаната бария ($BaTiO_3$) – одного из наиболее широко применяемых сегнетоэлектрических материалов. ИИ предложил проводить расчет по уравнению Борна-Майера, методу Хартри-Фока с использованием гибридных функционалов. Подбор методик можно считать оправданным.

Результат расчета по уравнению Борна-Майера полная энергия решетки складывается из электростатической составляющей (−185 эВ) и энергии отталкивания электронных оболочек (+32,5 эВ).

Расчет методом Хартри-Фока направлен на определение полной энергии системы, параметров элементарной ячейки и электронной структуры кристалла. Метод Хартри-Фока в чистом виде точно учитывает обменную энергию, однако не учитывает электронную корреляцию, что принципиально важно для оксидов переходных металлов. Поэтому на практике применяются гибридные функционалы, в частности B3LYP, сочетающий обмен Хартри-Фока с корреляционными поправками теории функционала плотности. В физических расчетах применяются функционалы другой группы, например HSE06. Для кристаллов расчет ведется не для отдельных молекул,

а для элементарной ячейки с использованием периодического потенциала; для титана и кислорода применяются базисные наборы типа 86-411(d31)G.

Параметры кристаллической решетки: для кубической фазы расчетный параметр составляет 0,4008–0,4021 нм (экспериментальное значение – 0,4004–0,4009 нм), для тетрагональной фазы – 0,3994 нм и 0,4022 нм. Минимум полной энергии (основное состояние) соответствует ромбоэдрической фазе. Энергия релаксации для кубической фазы составляет около 0,94 эВ, для тетрагональной – 0,52 эВ. Согласно анализу заселенности эффективные заряды в $BaTiO_3$ составляют примерно +1,8e для Ba, +2,4e для Ti и −1,4e для кислорода; связь барий–кислород носит преимущественно ионный характер, тогда как связь титан–кислород имеет значительную ковалентную составляющую.

Сравнение результатов расчетов различными методами приведено в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение результатов расчетов энергетических параметров $BaTiO_3$ различными методами

Метод	Запрещенная зона, эВ	Параметр решетки, Å
Эксперимент	3,20	4,00
Чистый метод Хартри – Фока	~12,0	4,02
Теория функционала плотности (LDA)	~1,70	3,94
B3LYP (глобальный гибрид)	3,4–3,8	3,99–4,01
HSE06 (экранированный гибрид)	3,20–3,25	3,98

Применение искусственного интеллекта для выбора метода расчета параметров кристаллической решетки

Современные системы искусственного интеллекта находят применение не только как инструменты автоматизации вычислений, но и как экспертные системы для выбора оптимальной расчетной стратегии. В рамках настоящего исследования была поставлена задача: на основании химического состава и кристаллохимических особенностей исследуемого соединения – титаната бария ($BaTiO_3$) – определить наиболее адекватный метод расчета па-

раметров кристаллической решетки с привлечением инструментов искусственного интеллекта.

Системе искусственного интеллекта была предоставлена информация о составе, типе химической связи (смешанный ионно-ковалентный характер), наличии фазовых переходов и практической значимости соединения. На основании анализа этих данных система рекомендовала применение гибридного функционала HSE06 в рамках теории функционала плотности с использованием периодических граничных условий как метода, обеспечивающего наилучший баланс между точностью описания электронной структуры оксидов переходных металлов и вычислительной эффективностью. В качестве обоснования было указано, что чистый метод Хартри – Фока завышает значение запрещенной зоны приблизительно в 3–4 раза, тогда как функционалы типа LDA систематически занижают параметр решетки; лишь экранированные гибридные функционалы типа HSE06 воспроизводят экспериментальные данные в допустимых пределах погрешности.

Расчеты, проведенные в соответствии с рекомендованной методологией, показали следующие результаты: запрещенная зона составила 3,20–3,25 эВ (экспериментальное значение – 3,20 эВ), параметр решетки – 0,398нм (экспериментальное значение – 0,400нм). Расхождение с экспериментом не превысило 0,5 %, что подтверждает корректность выбранной стратегии расчета. Полученные результаты согласуются с данными таблицы 2 и демонстрируют, что рекомендация системы искусственного интеллекта соответствует лучшим практикам современной вычислительной физики твердого тела.

Данный опыт свидетельствует о перспективности использования систем искусственного интеллекта в качестве вспомогательного экспертного инструмента при выборе расчетной методологии, особенно в случаях, когда исследователь не располагает глубокой специализацией в области квантово-химического моделирования кристаллических структур.

Заключение

В статье рассмотрен широкий спектр методов расчета параметров кристаллических решеток – от экспериментальных (цикл Борна-Габера, калориметрический метод, эффузия Кнудсена, рентгеноструктурный анализ) до классических аналитических (уравнения Борна-Ланде, Борна-Майера, Капустинского, метод межатомных потенциалов) и квантово-химических (теория функционала плотности, метод Хартри-Фока, гибридные функцио-

налы, методы высокого уровня). На примере титаната бария проведено сравнение результатов расчетов по различным методикам с экспериментальными данными.

Показано, что выбор метода расчета в значительной мере определяет точность получаемых результатов: применение чистого метода Хартри-Фока приводит к существенному завышению ширины запрещенной зоны, тогда как функционалы типа LDA систематически занижают параметр решетки. Наилучшее соответствие эксперименту обеспечивают гибридные функционалы, в особенности HSE06.

Продемонстрировано, что системы искусственного интеллекта способны выступать в роли экспертного инструмента при выборе расчетной стратегии: рекомендация, сформулированная на основе анализа химического состава и особенностей химической связи в исследуемом соединении, позволила получить результаты с отклонением от эксперимента менее 0,5 %. Это открывает перспективы для широкого применения подобного подхода при исследовании кристаллических структур, особенно в случаях, требующих оперативного выбора методологии без глубокой специализации в области вычислительной физики твердого тела.

Список используемых источников

1. Бацанов С. С. Структурная химия. Факты и зависимости. М.: Диалог-МГУ, 2000. 292 с.

2. Полторацкий Г. М., Мищенко К. П. Вопросы термодинамики и строения водных и неводных растворов электролитов. Л.: Химия, 1968. 352 с.

3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. 5-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 544 с.

4. Бокий Г. Б., Порай-Кошиц М. А. Рентгеноструктурный анализ. М.: Изд-во МГУ, 1964. 490 с.

5. Урусов В. С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ, 1987. 275 с.

6. Глебов В. А. Электронное строение и свойства уранильных соединений. М.: Энергоатомиздат, 1983.

7. CRYSTAL: программный пакет для квантово-химических расчетов кристаллических структур. URL: https://www.crystal.unito.it/ (дата обращения: 26.02.2026).

8. Dreizler R. M., Gross E. K. V. Density Functional Theory. Berlin: Springer, 1990.

9. Метод Хартри-Фока в теории ядра / Б. И. Барц [и др.]; ред. А. И. Ахиезер; АН УССР. Харьков. физ.-техн. ин-т. Киев: Наук. думка, 1982.

10. Szabo A., Ostlund N. S. Modern Quantum Chemistry: Introduction to Advanced Electronic Structure Theory. New York: Dover Publications, 1996.

REVIEW OF SUCCESSFUL APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CALCULATING THE MAIN PARAMETERS OF CRYSTAL LATTICES

Arsiriy A., Ryzhikova T.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The article presents an overview of methods for calculating the parameters of crystal lattices, ranging from experimental approaches to quantum chemical ones. Classical analytical methods are discussed, including the Born–Landé and Born–Mayer equations, the Kapustinskii equation, and the interatomic potential method, as well as quantum chemical methods such as density functional theory, the Hartree–Fock method, and hybrid functionals. Using barium titanate as an example, a comparison is made between calculated and experimental values of the band gap and lattice parameter. The potential of artificial intelligence systems as an expert tool for selecting the optimal calculation methodology is demonstrated. It is established that the recommendation generated by the artificial intelligence system yielded results with a deviation from experimental data of less than 0.5 %.

Key words: crystal lattice, lattice energy, density functional theory, Hartree–Fock method, hybrid functionals, artificial intelligence, barium titanate, quantum chemical methods

УДК 004.42
ГРНТИ 50.41.33

СУПЕРПРИЛОЖЕНИЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ И РАЗВИТИЕ

К. В. Белоус, Е. А. Пиликина, А. П. Шабанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются перспективы использования суперприложений – многофункциональных платформ, объединяющих финансовые, телекоммуникационные и государственные услуги. Большое внимание уделено России, где быстро растет спрос на использование пользователями многофункциональных приложений. Приведен пример успешного внедрения и применения суперприложений крупным игроком на рынке, таким как OZON банк.

суперприложение, микрофронтенды, микросервисы, цифровые технологии

Современная цифровая среда стремительно развивается, и в последние годы сформировался уникальный феномен – суперприложения (super-apps), которые кардинально меняют представление о взаимодействии пользователей с финансовыми и телекоммуникационными сервисами. Эти платформы объединяют широкий спектр удаленных функций: от оплаты товаров, управления личными финансами до заказа различных услуг государственных органов и организации повседневной жизни.

Для установки нужных современному человеку приложений необходимо расширять память гаджетов, но удобнее и надежнее пользоваться super-apps (супераппами), потому что, именно они успешно предоставляют десятки сервисов, которые помогают управлять различными аспектами повседневной жизни, в том числе и бизнесом через смартфон.

Суперприложение (super-app) – это мобильная приложение-платформа, объединяющая множество различных сервисов и функций, позволяет пользователям решать разнообразные задачи в рамках единой экосистемы. Ядром концепции является экосистема, удерживающая пользователей внутри платформы. Главная цель любой технологической компании заключается в том, чтобы привязать аудиторию к своим цифровым продуктам [1].

Можно рассматривать суперприложения как замкнутую операционную систему внутри приложения, предоставляющую инструментарий и платформу для запуска мини-приложений (мини-аппов) [2] (рис. 1).

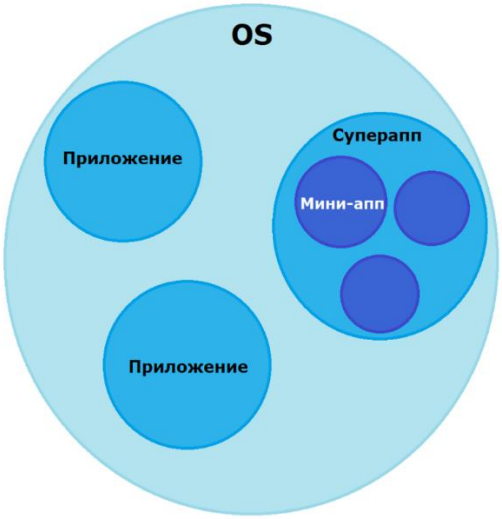


Рис. 1. Архитектура суперприложения

Архитектура супераппа состоит из:

1. Ядра, отвечающего за регистрацию, авторизацию, интерфейс и управление данными.
2. Интеграционного слоя (API-шлюзы), связывающего модули между собой и с внешними сервисами.
3. Сервисов/мини-приложений, которые выполняют независимые функции: чат, доставка, оплата, маркетплейс.
4. Платежной инфраструктуры, встроенного кошелька или сервиса микроплатежей, банковских интеграций.
5. Системы аналитики и персонализации для сбора данных о поведении пользователя, рекомендаций, машинного обучения.

Внутреннее устройство и технологии

Супераппы строятся по принципу микрофронтендов и микросервисов (рис. 2). Причем, каждый сервис – это независимый компонент, связанный с остальными через API-шлюзы и service mesh – специальную сеть, распределяющую нагрузку и данные между сервисами [3].

Микросервисы и микрофронтенды в приложении могут быть связаны следующим образом: микрофронтенды отвечают за интерфейс, микросервисы обрабатывают данные, соединяются они между собой через API-шлюз [4].

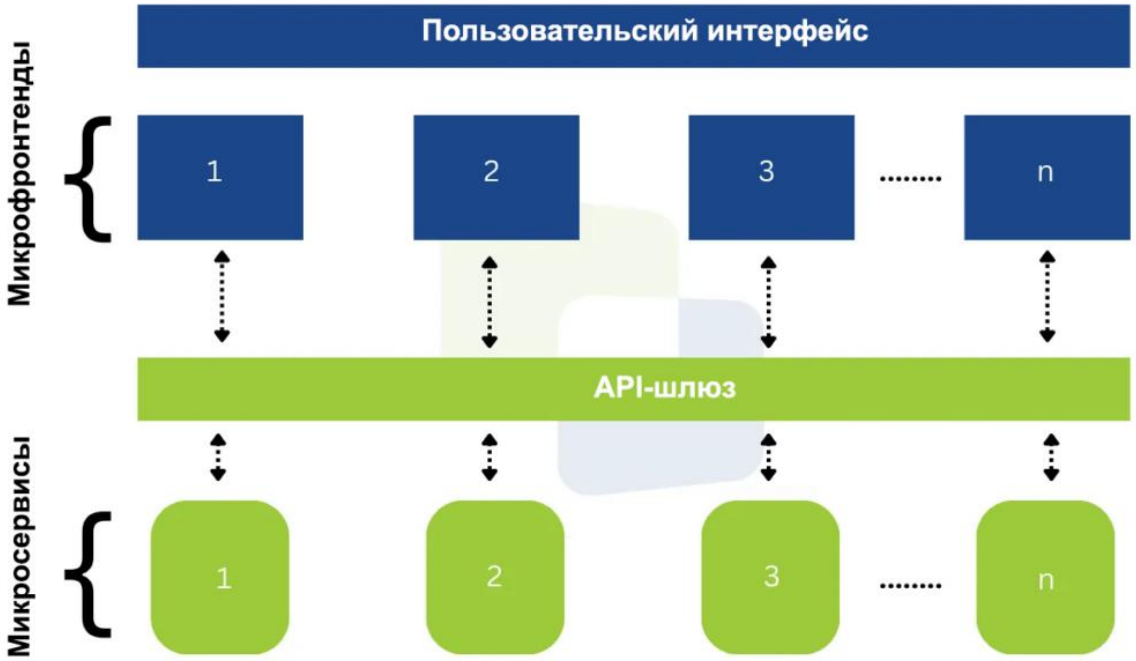


Рис. 2. Соединение микросервисов и микрофронтендов через API-шлюз

Несмотря на наличие некоторых отличий:

1. Разбиением функциональности бэкенда на независимые сервисы занимаются микросервисы, микрофронтенды применяют данную концепцию к пользовательскому интерфейсу.

2. Обработка функциональности бэкенда (операций с базами данных, API. осуществляется микросервисами.

3. Микрофронтенды управляют пользовательским интерфейсом, обрабатывая взаимодействие с пользователем.

Обе модели имеют общие цели, несмотря на различия:

1. Каждый микросервис/микрофронтенд функционирует независимо.

2. Команды могут разрабатывать и разворачивать без необходимости координировать свои действия с другими командами.

3. Каждый сервис или фронтенд может масштабироваться независимо для удовлетворения потребностей пользователей.

Согласно национальному проекту «Экономика данных и цифровая трансформация государства» [5], который стартовал в 2025 году по решению Президента России, сделаны некоторые шаги по внедрению цифровых технологий в повседневную жизнь, а именно:

1. Дальнейшее развитие цифровой инфраструктуры. Использование устойчивого высокоскоростного интернета в сельской местности, которое

привело к более активному использованию россиянами дистанционного образования и государственных цифровых сервисов.

2. Укрепление и совершенствование цифрового государственного управления, когда Госуслуги переводятся в формат «жизненных ситуаций» – комплексные цифровые сценарии, объединяющие услуги по логике конкретного жизненного события.

3. Появление новых сервисов в экосистемах Госуслуг.

4. Совершенствование инструментов самозащиты от мошенников. Появилась возможность наложить запрет на оформление кредитов и договоров связи, проверка SIM-карты, использование доверенного контакта для защиты аккаунта на Госуслугах.

5. Использование искусственного интеллекта, который стал одним из ключевых инструментов повышения эффективности государственного управления и развития регионов.

6. Быстрое импортозамещение ИТ-решений. В 2025 году в реестре российского программного обеспечения зарегистрировано 24 850 отечественных программных продуктов.

Типичным примером супераппа является Ozon Банк – это крупный российский банк, занимает первое место по объему онлайн-платежей в России, включен Центральным банком Российской Федерации в список 18 значимых банков на рынке платежных услуг. У него имеется широкая клиентская база (больше 35 миллионов физических лиц).

Ozon Банк решает задачи как продавцов (селлеров) и покупателей, так и самого маркетплейса. При этом продавцы получают быстрые выплаты, доступ к кредитам и удобные отчеты, а покупатели – безопасную оплату, бонусы и рассрочку. Для снижения издержек, ускорения внедрения новых услуг и повышения доверия пользователей используется единый интерфейс, без сложных интеграций и внешних рисков.

Наличие собственного банка дает группе Ozon полный контроль над качеством клиентского опыта, процесс происходит внутри экосистемы – быстро, прозрачно и без лишних этапов, это касается также возвратов и отмен заказов: деньги возвращаются напрямую через Ozon Банк, без посредников, что значительно экономит время и снижает количество обращений в поддержку. Это повышает лояльность клиентов.

Перспективой развития технологии суперапповв представляется в создании приложений, дающих доступы к различным сервисам получения информации, получения услуг предприятиям, организациям, в том числе орга-

низациям здравоохранения, органов государственной власти с переходом в госуслуги, правоохранительных органов. После прохождения идентификации подтверждения личных данных, у человека появляется возможность открывать вклады и пользоваться различными счетами, регистрировать предприятия, готовить и передавать налоговую отчетность, получать государственную поддержку и льготы от государства, предлагать свои услуги и товары на рынке, реализуя тем самым принцип «Одной кнопки».

За суперприложениями будущее, они упрощают жизнь и разработчикам, и пользователям, и в современную концепцию развития крупного бизнеса вписываются наилучшим образом. По прогнозам Morgan Stanley, к 2026 году российский рынок супераппов достигнет $150+ млрд. А согласно исследованию McKinsey, 67 % пользователей предпочитают решать несколько задач в одном приложении, чем переключаться между разными сервисами. Суперапппы перестали быть экзотикой – сегодня это один из главных трендов digital-рынка.

Список используемых источников

1. Что такое суперапппы? // HandH. URL: https://handh.ru/post/superapp (дата обращения: 05.02.2026).

2. Что такое суперприложения и почему это стало трендом? // Softline. URL: https://softline.ru/about/blog/superprilozheniya-chto-eto-takoe-i-pochemu-eto-stalo-trendom (дата обращения: 05.02.2026).

3. Что такое суперприложения и почему в них инвестируют крупные компании? // Workspace. URL: https://workspace.ru/blog/chto-takoe-superapp-vsye-o-superprilozheniyakh/ (дата обращения: 05.02.2026).

4. Ньюмен С. Создание микросервисов. СПб.: Питер, 2016. 304 с.: ил. (Серия «Бестселлеры O’Reilly»). ISBN 978-5-496-02011-4.

5. Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства»: утв. Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам. 2024. URL: https://digital.gov.ru /ru/activity/national-projects/ (дата обращения: 10.02.2025).

SUPERAPPS: PROSPECTS AND DEVELOPMENT

Belous K., Pilikina E., Shabanov A.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the prospects for using superapps, which are multifunctional platforms that combine financial, telecommunications, and government services. Special attention is given to Russia, where there is a growing demand for users to use multifunctional apps. The article provides an example of the successful implementation and use of superapps by a major market player, such as OZON Bank.

Key words: superapp, microfrontends, microservices, digital technologies

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.29

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ АНТЕНН ДВ ДИАПАЗОНА

М. Г. Борисов, К. О. Коровин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В связи с развитием систем подвижной связи в низкочастотном диапазоне особую актуальность приобретает разработка перебазируемых и эффективных мобильных антенн ДВ-диапазона. Статья посвящена сравнительному анализу вариантов их построения для радиосвязи. Основными рассматриваемыми вариантами являются: стелющиеся, мачтовые и тросовые конструкции антенн. Исследование фокусируется на оценке их эксплуатационных характеристик с учетом компромисса между габаритами, оперативностью развертывания и эффективностью излучения. По результатам анализа даются рекомендации по выбору оптимальной антенной конфигурации для связи в сложных условиях.

радиовещание, радионавигационные системы, наземное базирование, антенны, мобильные комплексы, Т-образные антенны, Г-образные антенны, зонтичные антенны, рамочные антенны, стелющиеся антенны

В связи с развитием систем подвижной связи и навигации в низкочастотном спектре особую актуальность приобретает разработка мобильных и эффективных антенн ДВ-диапазона. Длинные волны (частоты от 30 до 300 кГц, длины волн от 10 до 1 км) обладают уникальной способностью огибать значительные препятствия и распространяться на большие расстояния за счет отражения от ионосферы и поверхности Земли, что делает этот диапазон незаменимым для ряда специальных задач. В частности, частоты 30–50 кГц используются для связи с подводными лодками благодаря способности проникать в морскую воду, поддиапазон 50–100 кГц применяется в импульсно-фазовых радионавигационных системах (таких как «Чайка» и «Loran-C»), а частоты 100–200 кГц отведены под длинноволновое радиовещание и аэронавигационные маяки.

В системах ДВ-диапазона применяется несколько основных типов антенн, выбор которых определяется условиями эксплуатации (стационарные или подвижные объекты) и решаемыми задачами – от глобальной навигации и связи с подводными лодками до радиовещания.

Для стационарных береговых и вещательных станций, где первостепенное значение имеет эффективность излучения, исторически сложилось использование крупногабаритных вертикальных антенн. Наиболее распространенными конструкциями таких стационарных антенн являются конфигурации используемые в системах радионавигации «Loran» и «Чайка», к ним относятся: зонтичные антенны, SLT и перевернутые конусные антенны (TIP) [1].

Указанные выше конфигурации за счет существующих вариантов исполнения перебазируемых (мобильных) мачт или тросов с БПЛА могут также рассматривается как мобильные при условиях уменьшения габаритных показателей.

Таким образом в ДВ диапазоне применяются следующие основные конструкции: зонтичные, Т-образные (стандартные, SLT и TIP), Г-образные (стандартные и с дополнительной емкостной нагрузкой), монополи (на тросе с подъемным устройством и на мобильном мачтовом комплексе), стелющиеся и рамочные. Рассмотрим каждый вариант по отдельности.

Зонтичные конструкции используют в своей основе зачастую изолированную мачту, увенчанную системой наклонных лучей для формирования емкостной нагрузки (см. рис. 1). Главным преимуществом зонтичной конструкции является компактность: она занимает значительно меньше места, так как требует только одной центральной мачты, а лучевые растяжки выполняют одновременно функцию емкостной нагрузки и механических оттяжек. Тем не менее, как и в случае с Т-антеннами, излучающей частью является преимущественно вертикальный провод (мачта), а горизонтальные и наклонные лучи служат для улучшения распределения тока.

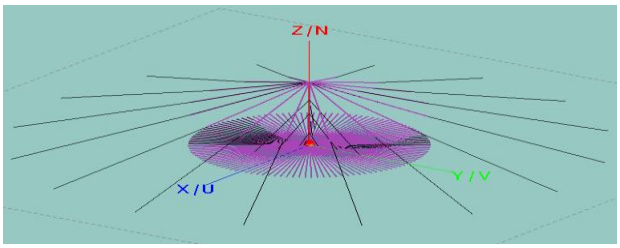


Рис. 1. Конструкция зонтичной антенны

Т-образные и Г-образные антенны представляют собой классические типы несимметричных вертикальных излучателей с емкостной нагрузкой, широко применяемые в ДВ-диапазоне. Конструктивно они состоят из горизонтальной части (полотна) и вертикального снижения, однако отличаются точкой подключения последнего: в Т-образной антенне вертикальный провод крепится к центру горизонтального полотна, тогда как в Г-образной –

к одному из его концов. Принцип действия горизонтальной части такой же, как и для зонтичной. Критическим фактором, определяющим эффективность обеих антенн, как и зонтичной, является качество системы заземления. Конструкции представлены на рис. 2.

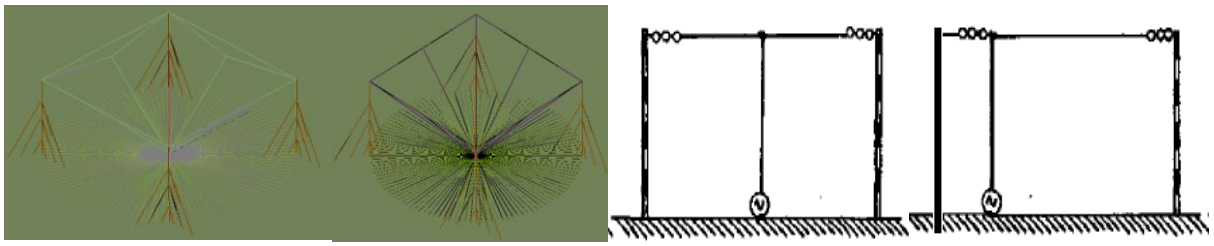


Рис. 2. Конструкция SLT, TIP, Т-образной и Г-образной антенны

Сравнительный анализ обычных Г-образных и Т-образных антенн с зонтичной показывает преимущество последней. Это объясняется тем, что использование наклонных лучей позволяет отказаться от использования дополнительных опор для крепления, увеличить надежность за счет применения оттяжек (лучей емкостной нагрузки), а также повысить емкость и эффективность излучения за счет удлинения лучей емкостной нагрузки и расположения их под небольшим углом к снижению антенны (вертикальной части).

Также не стоит забывать и существующих модифицированных вариантах использования Т-образных конструкций (SLT, TIP), имеющих в своем составе несколько параллельно включенных Т-образных антенн. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ конфигураций антенн

	Зонтичная [2]	SLT [2]	TIP [2]	Т-образная [3]	Г-образная [3]
Вх. сопротивление	6,906 – j46,029	8,115 + j13,714	5,31 – j44,545	11,45 – j10,1	12,01 – j12,2
КПД	84,1	83,3	83,4	75,8	74,3
Полоса пропускания	4334 Гц	22847 Гц	17053 Гц	1000 Гц	1500 Гц
Эффективная высота	189,9 м	348,0 м	281,7 м	-	-
Резонансная частота	116,47 кГц	94,74 кГц	135,45 кГц	200 кГц	200 кГц
$2\Delta F*\eta$	3645,4 Гц	19048 Гц	14222 Гц	758 Гц	1114,15 Гц

В диапазоне длинных волн (ДВ) применяются также *стелющиеся антенны*, представляющие собой горизонтальный длинный проводник, расстеленный на земной поверхности (см. рис. 3). Принцип работы основан на наличие в горизонтально поляризованной волне составляющих вертикальной поляризации.

Недостатком такой конфигурации является низкая эффективность, сильно зависимая от подстилающей поверхности, узкая полоса пропускания, усложняющая перестройку и согласование. Достоинством данной конфигурации является ее простота, надежность и незаметность. Таким образом данный тип конструкции обладает значительной мобильностью, но ограничен в районах размещения (требуется слабопроводящие скальные породы для минимизации воздействия земли). Характеристики стелющиеся антенны представлены в таблице 2.

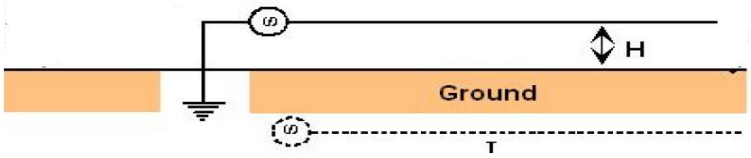


Рис. 3. Конструкция стелющиеся антенны

ТАБЛИЦА 2. Характеристик существующей стелющиеся антенны

	R = 34 км [4]
Вх. сопротивление	174 – j5,3
КПД	6
Полоса пропускания	-
Эффективная высота	-
Резонансная частота	19,5 кГц
$2\Delta F^*\eta$	-

Монополь, выполненный на основе троса и подъемного средства или быстровозводимой мачты обладает наилучшим значением эффективности при соизмеримости его размеров к четверти длины волны. При таких значениях эффективность излучения по сравнению с другими вариантами будет максимальной, но высота подъема троса/мачты значительно ограничены мобильностью средства. Поэтому данные антенны наряду со стелящимися обладают наилучшей мобильностью, но эксплуатация данных антенн усложняется зависимостью от погодных условий, необходимости установки значительного заземления и низкой полосой пропускания. Сравнительные характеристики приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительные характеристики тросовой антенны

	H=100 м	H = 350 м	H = 500 м
Вх. сопротивление	0,91 – j2448	6,37 – j661,4	13,97 – j356,2
КПД	48,8	92,6	95,4
Полоса пропускания	37 Гц	962,4 Гц	3922,3 Гц
Эффективная высота	-	-	-
Резонансная частота	750 кГц	215 кГц	150 кГц
2ΔF*η	18,056	891,18	3741,9

Рамочные антенны представляют собой антенны, функционирующие на основе взаимодействия с магнитной компонентой электромагнитного поля. В отличие от электрических (штыревых или проволочных) антенн, реагирующих на напряженность электрического поля E, рамочные антенны реагируют на производную магнитного потока по времени.

Подводя итоги сказанному сформирована, сводная таблица (см. таблица 4), отражающая преимущества и недостатки рассматриваемых конфигурации.

ТАБЛИЦА 4. Результаты сравнительного анализа рассматриваемых конфигураций

	Зонтичная	Т-образная	Г-образная	Стелющаяся	Монополь	Рамочная
КПД	Высокий (<85 %)	Средний (<75 %)	Средний (<75 %)	Низкий (<10 %)	Очень высокий (<95 %)	Очень низкий (<5 %)
Скрытн.	Крайне низкая	Низкая	Низкая	Высокая	Средняя	Очень высокая
Время разв.	Сутки	Сутки	Сутки	Мгновенно	Часы	Мгновенно
Полоса проп.	Узкая	Узкая	Узкая	Крайне узкая	Узкая	Крайне узкая
Мех. прочность	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая	Средняя	Высокая
Вмещ. мощность	Очень высокая	Высокая	Высокая	Средняя	средняя	Очень низкая

Анализируя сводную таблицу 1, можно сделать следующие выводы. Рассматривать рамочную антенну как мобильную для передающих центров крайне нерационально. Это объясняется крайне малой вмещаемой мощно-

стью и малым значением КПД. Похожими характеристиками обладает стелящаяся антенна, за исключением того, что она может выступать в качестве передающей за счет повышенного КПД и вмещаемой мощности, также данная конфигурация обладает высокой мобильностью на ряду с рамочными антеннами. Если следует рассматривать эффективную мобильную антенну, то следует обратить внимание на монополь, выполненный на мобильном мачтовом комплексе или тросе с подъемным механизмом. Сравнение зонтичной, Т-образной и Г-образной позволяет сказать, что зонтичная антенна более эффективная, но это легко нивелируется различными модификациями Т-образных антенн, которые значительно сложней, но более эффективны.

Таким образом, на основе представленного анализа наиболее перспективным вариантом реализации мобильных антенн ДВ диапазона для радиосвязи и радионавигации является антенна типа монополь. Причем наиболее перспективна реализация на тросе и подъемном устройстве, за счет подстройки необходимой высоты для обеспечения максимальной эффективности излучения, за счет незначительного “пожертвования” времени развертывания.

Список используемых источников

1. Hu Z. et al. Simulation-Based Selection of Transmitting Antenna Type for Enhanced Loran System in Selected Location // Applied Sciences. 2022. Т. 12. № 12. С. 6031.

2. Борисов М. Г., Коровин К. О. Анализ вариантов построения антенн систем наземной навигации // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024): Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. В 2-х т. СПб: СПбГУТ, 2025. С. 603-608.

3. Trainotti V., Dorado L. A. Short low-and medium-frequency antenna performance //IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2006. Т. 47. № 5. С. 66-90.

4. Chevalier T. W., Inan U. S., Bell T. F. Characterization of terminal impedance and radiation properties of a horizontal VLF antenna over Antarctic ice //Radio science. 2006. Т. 41. № 06. С. 1-11.

ANALYSIS OF DESIGN OPTIONS FOR MOBILE LW-BAND ANTENNAS

Borisov M., Korovin K.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

With the development of mobile communication systems in the low-frequency range, the development of relocatable and efficient mobile LW antennas has become especially relevant. This article is devoted to a comparative analysis of design options for radio communications. The main options considered are: trailing, mast, and cable antenna designs. The study focuses on evaluating their performance characteristics, taking into account the trade-offs between size, deployment efficiency, and radiation efficiency. Based on the analysis, recommendations are provided for selecting the optimal antenna configuration for communications in challenging conditions.

Key words: radio broadcasting, radio navigation systems, ground-based, antennas, mobile complexes, T-shaped antennas, L-shaped antennas, umbrella antennas, loop antennas, creeping antennas

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

УЧЕБНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОНИКИ: ОТ СУЩЕСТВУЮЩЕГО К ВОЗМОЖНОМУ

С. В. Борисов[1], А. Э. Ланда[1], Ю. С. Остроумова[2], С. Д. Ханин[1]

[1]Санкт –Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
[2]Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова

Раскрывается ресурсность учебного практикума по физическим основам электроники в плане освоения обучающимися экспериментального подхода к получению и применению научных знаний. Определяются и обосновываются ориентиры необходимой для достижения указанной цели образовательной деятельности: придание освоению экспериментального подхода целостного и деятельностного характера, настройка содержания и организация практикума на раскрытие физических основ перспективных направлений научно-технологического развития и изучение передовых исследовательских технологий, расширение учебно-информационного и педагогико-технологического обеспечения практикума. Предлагаются методические средства и апробированные разработки, могущие быть использованными в практике обучения.

экспериментальный подход, целостное и деятельностное освоение, проблематика научно-технологического развития, передовые исследовательские технологии, учебно-информационное и педагогико-технологическое обеспечение практикума

Будучи неотъемлемой частью направленного на подготовку инженерных, медицинских и педагогических кадров образовательного процесса, физический практикум призван к формированию у обучающихся умений и опыта продуктивной реализации экспериментального подхода к получению и применению требуемых знаний. Однако, если задаться вопросом о том, в чем состоят на сегодняшний день эти умения и опыт и отвечает ли их уровень требованиям в рассматриваемом аспекте к профессиональной подготовке специалиста, ответ чаще всего будет неутешительным. Содержание заданий традиционно реализуемого практикума, как правило, практически лишено проблемности, а в их выполнении доминирует заданность. Самостоятельная работа обучающегося ограничивается получением по предписываемому алгоритму опытных данных и их сравнением с расчетными данными, отвечающими предположительно известным из теоретической части курса модельным представлениям. При этом не приходится удивляться, что выполнение практикума не вызывает у обучающихся долж-

ного энтузиазма, и они относятся к нему исключительно как к обременительной обязанности, необходимой для прохождения аттестации. Как следствие, эффективность практикума оказывается далекой от желаемой.

Сказанное относится и к практикумам по профессионально ориентированным физическим дисциплинам, каковой для широкого круга инженерных специальностей являются физические основы электроники. Вместе с тем здесь скрыты существенные резервы освоения экспериментального подхода к решению проблемных задач.

Предпосылки тому – возможность аккумулировать умения и опыт, приобретенные обучающимися в курсе общей физики, направленность обучения на освоение физики конкретных, профессионально значимых объектов базовых для функциональных технических систем элементов электроники и фотоники. Реализация сказанного в практике обучения с необходимостью требует системных изменений в содержании, организации и ресурсном обеспечении практикума, определению и осуществлению которых посвящена настоящая работа.

Основанием выдвигаемых в ней положений, наряду с общедидактическими принципами и психологией профессионального образования, явились результаты исследований в области методико-технологического обеспечения обучения физике в вузах, наиболее полно представленные в [1–3], и практический опыт работы в науке и образовании.

Первое формулируемое утверждение состоит в необходимости создания условий для целостного и деятельностного освоения экспериментального подхода к получению и применению научных знаний.

Целостность освоения предполагает востребованность при выполнении практикума не только получения опытных данных, но и сущностного понимания истоков и содержания заданий, обоснования выбора методики эксперимента, конструктивного анализа его результатов, в том числе на предмет их практического использования.

Деятельностный характер освоения высокий уровень познавательной самостоятельности обучающихся в реализации присущих экспериментальному подходу видов деятельности: детерминированных необходимостью успешного выполнения заданий самообразования, информационно-аналитической работы, планирования и реализации программы эксперимента, установления на основе его результатов подлежащей освоению физической картины работы элементов электронной базы.

Средствами достижения этих целей могут служить:

– проектная форма постановки заданий и организации деятельности по их выполнению в ходе прохождения практикума;
– включение в содержание практикума учебно- и научно-исследовательских заданий;
– интегративное единство фундаментального и прикладного компонентов в содержании и организации выполнения практикума;
– настройка практикума на освоение методологического ресурса моделирования как средства осуществления постановочного, ориентировочного и аналитического этапов, связующего звена между экспериментом, теорией и практикой [4, 5];
– задействованность наряду с натурным экспериментом, вычислительного эксперимента с максимально возможной самостоятельностью обучающихся в его программном обеспечении.

Преследуя цель формирования готовности к продуктивной поисково-познавательной деятельности в целях решения актуальных проблемных задач, освоение содержания практикума должно требовать высокого уровня организации умственной деятельности.

Конкретизируем сказанное на примере следующих двух апробированных в практике обучения учебно-исследовательских заданий. Первое задание состоит в изыскании материалов, могущих служить для создания элементов оптической памяти в спектральных диапазонах видимого и ультрафиолетового излучения. Располагая лишь общими сведениями об оптическом поглощении и фотоэлектрических явлениях в собственных и слаболегированных полупроводниках, обучающиеся с необходимостью должны расширить свои знания в этой области. При этом в поле их зрения попадают сильно легированные и сильно компенсированные полупроводники с присущими им крупномасштабными флуктуациями потенциала [6]. Последнее, как показывается на основе анализа модели энергетического спектра указанных материалов, приводит к пространственному разделению электронов и дырок и, как следствие, может приводить к долговременной временной релаксации фотопроводимости, что подтверждается экспериментально.

В качестве перспективных материалов для создания элементов памяти в ультрафиолетовом диапазоне интерес представляют некристаллические оксиды переходных металлов с присущей им в силу прыжкового механизма транспорта низкой подвижностью носителей заряда [7, 8].

На основе аналитического решения задачи о частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь двухслойного по проводимости, в силу собственного поглощения в приповерхностной области диэлектрика образца, обучающиеся приходят к выводу о возможности наблюдения эффекта фотопамяти, состоящего в смещении со временем, прошедшим после оптического возбуждения, характерного для указанной зависимости максимума тангенса угла диэлектрических потерь в область более низких частот и увеличении при этом его максимального значения. В силу доступности формирования оксидных слоев методом электрохимического оксидирования металлов, выполнение данного задания может представлять собой предметный урок целостного научно-технологического решения практической задачи.

Второй выразительный, в плане использования возможностей вычислительного эксперимента, пример состоит в проектировании композитного резистивного материала, обладающего требуемыми для миниатюризации элементов высоким удельным сопротивлением и одновременно малым его температурным коэффициентом. Выбор здесь падает на металлодиэлектрические композиты, которые, как показывает анализ соответствующих моделей [9], обладают требуемыми свойствами вблизи порога протекания. Определение последнего становится целью вычислительного эксперимента, программное обеспечение которого разрабатывается самими студентами [5]. Далее, посредством натурного эксперимента по характеризации материала, фазовый состав которого отвечает рекомендуемому на основе вычислительного эксперимента, результаты последнего получают верификацию.

Второе утверждение состоит в необходимости обращенности учебного физического практикума к проблематике перспективных направлений научно-технологического развития и к передовым исследовательским технологиям.

Актуальность этого направления модификации практикума обусловлена ресурсностью его результатов в плане повышения мотивированности обучающихся и придания практикуму основательности для последующего обучения и будущей профессиональной деятельности.

Целесообразными средствами здесь являются:

– внесение в практикум физических аспектов проблематики перспективных направлений научно-технологического развития;

– постановка заданий, ориентированных на освоение методов современных исследовательских технологий в их практическом применении к актуальным для науки и практики объектам и процессам;
– включение в структуру практикума реферативных семинаров по актуальным, профессионально значимым для обучающихся проблемам;
– привлечение к образовательному процессу специалистов ведущих научных и научно-образовательных центров на предмет приобщения обучающихся к осуществляемым в настоящее время исследованиям и проектам мирового уровня.

В качестве ориентиров при проектировании интегрируемых в практикум заданий и новых видов занятий могут служить: характеризация особенностей подлежащих изучению в рассматриваемом контексте и предопределяющих требования к методам эксперимента объектов и процессов; востребованность предметного понимания информативности и функционала отдельных классов экспериментальных методов исследований; применение комплексного, предполагающего обоснованное привлечение для экспериментального решения задачи различных взаимодополняющих друг друга методов подхода, выработка критического отношения к оценке достигнутых результатов и обоснованное определение направления дальнейшей деятельности.

Примерами реализации сказанного могут служить разработанные и апробированные к настоящему времени занятия по физике приборных структур с функциональными элементами нанометровых размеров и материалов для их создания, освоение методов сканирующей зондовой микроскопии и широкодиапазонной спектроскопии полной проводимости [12], анализу и диагностике полупроводниковых гетероструктур приборного назначения, применению исследовательских технологий в медицине.

Третье утверждение заключается в необходимости расширения учебно-информационного и педагогико-технологического обеспечения учебного физического практикума.

Новые приоритеты диктуют необходимость руководствоваться в содержательном наполнении и представлении материала в информационных источниках проблемно-деятельностного подхода [11], придерживаясь динамической развертки предметного материала сообразно действительной логике и методологии решения проблемных задач.

Наряду с разработкой учебных пособий нового, отвечающего вызовам времени поколения, необходима работа по адаптации к образовательному

процессу содержания представляющих интерес научных монографий, обзоров, статей, Нобелевских лекций как источников, позволяющих получить адекватные представления о приведшей к значимым результатам поисково-познавательной деятельности и ее передовых достижениях [12].

В части педагогико-технологического обеспечения практикума необходимо максимально возможно широкое использование в организации образовательного процесса настойчиво рекомендуемых, но еще не нашедших должного применения в практике обучения методов активных технологий [13]. В ряду этих методов особого внимания в рассматриваемом контексте заслуживает проектно-исследовательский метод, возможность распространения которого на практикум показана в работе [3].

Список использованных источников

1. Ханин С. Д., Хинич И. И. Исследовательское обучение физическим основам электроники в подготовке педагогических кадров. Монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 127 с.

2. Ханин С. Д., Хинич И. И. Освоение физики материалов и приборов электронной техники и проблема достижения целостности и результативности исследовательского обучения. Монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 108 с.

3. Остроумова Ю. С. Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач. Монография. СПб.: ВАС, 2019. 240 с.

4. Антифеева Е. Л. Развитие умений физического моделирования при изучении электронной теории конденсированного состояния на факультетах физики вузов: дисс.... канд. пед. наук: 13.00.02 / Антифеева Елизавета Львовна. Санкт-Петербург, 2002. 182 с.

5. Смирнов А. А. Взаимосвязь эксперимента, теории и практики в обучении физике конденсированного состояния вещества: дисс...канд. пед. наук: 13.00.02 / Смирнов Андрей Александрович. Санкт-Петербург, 2006. 169 с.

6. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. А. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 672 с.

7. Ханин С. Д. Модели явлений прыжкового переноса и методы анализа электронных свойств неупорядоченных систем с сильной локализацией носителей // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. Естественные и точные науки. 2002. № 2. С. 47–56.

8. Физика неупорядоченных и наноструктурированных оксидов и халькогенидов металлов. Монография / Под ред. Г. А. Бордовского. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2003. 382 с.

9. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.

10. Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Об информативности динамического подхода к анализу и применению транспортных свойств функциональных диэлектрических материалов с неупорядоченной структурой // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб: СПб ГУТ, 2025. Т.1. С.335-340.

11. Борисов С. В., Ланда А. Э., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д., Шумаков П. П. Проблемно-деятельностный подход к обучению физическим основам электроники: предпосылки использования и методико-технологическая разработка // Актуальные про-

блемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб: СПб ГУТ, 2025. Т.1. С.266-271.

12. Костарев С. В., Жуков В. А., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Предпосылки и ориентиры обновления учебно-методического обеспечения обучения физике при подготовке инженерных кадров // Физическое образование: от прошлого к будущему: Материалы Всероссийской научно-методической конференции с международным участием памяти проф. Н.М. Кожевникова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С.66-71.

13. Селевко Г. К. Энциклопедия образовательных технологий: М.: НИИ школьных технологий, 2019. в 2 т. 1632 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры Э СПбГУТ, доктором технических наук, профессором С. Д. Ханиным.

TRAINING WORKSHOP ON THE PHYSICAL FUNDAMENTALS OF ELECTRONICS: FROM THE EXISTING TO THE POSSIBLE

Borisov S.[1], Landa A.[1], Ostroumova Yu.[2], Khanin S.[1]
[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications
[2]S. M. Kirov Military Medical Academy

The article reveals the resource potential of the training workshop on the physical foundations of electronics in terms of students mastering an experimental approach to obtaining and applying scientific knowledge. The guidelines for the educational activities necessary to achieve this goal are defined and justified: making the development of an experimental approach holistic and activity-based, setting up the content and organization of the workshop to reveal the physical foundations of promising areas of scientific and technological development and the study of advanced research technologies, expanding educational, informational, pedagogical and technological support for the workshop. Methodological tools and proven developments are proposed that can be used in the practice of teaching.

Key words: experimental approach, holistic and activity-based learning, problems of scientific and technological development, advanced research technologies, educational, informational, pedagogical and technological support of the workshop

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

СОЗДАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТНОГО ОСВОЕНИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

С. В. Борисов[1], А. Э. Ланда[1], Ю. С. Остроумова[2],С. Д. Ханин[1], П. П. Шумаков[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
[2]Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова

Предлагаются подходы к формированию умений проектирования на физическом уровне элементов электроники и фотоники и материалов для их создания. Развивается модель обучения, предписывающая представление и освоение его содержания в задачно-деятельностной форме и организацию учебного процесса на основе проектно-исследовательского метода. Аргументируется необходимость и показываются возможности осуществления направленной на достижение указанной цели поэтапной образовательной деятельности. Приводится апробированные методические разработки, могущие быть использованными в образовательном процессе.

материалы и элементы электроники и фотоники, физический подход к проектированию, проблемные задачи, проектно-исследовательское обучение, условия результативности обучения.

Доказавший свою эффективность и далеко еще не исчерпавший свой потенциал физический подход к проектированию функциональных элементов электронной базы технических систем, несомненно, заслуживает должного отражения в направленном на подготовку специалистов образовательном процессе. Существующее же здесь состояние дел чаще всего далеко от желаемого.

Основная причина тому – продолжающий доминировать в преподавании физических основ электроники сообщающий характер обучения. Представляемая в учебном процессе информация о лежащих в основе принципа действия базовых элементов электроники и фотоники физических эффектах не трансформируется, в силу пассивной позиции обучающихся, в полноценные, могущие быть продуктивно использованными для достижения новых целей, знания.

Для улучшения ситуации в этом отношении освоению предметного материала физических основ электроники в практике обучения необходимо придать деятельностный характер, для чего с очевидностью требуется соответствующее методико-технологическое обеспечение. Необходимость его развития стала стимулом настоящей работы. Направляющей в ней явились результаты проведенных исследований [1, 2] и практический опыт преподавания авторов.

В качестве лейтмотива работы выступает необходимость последовательной реализации в образовательном процессе проблемно-деятельностного подхода [3-5], отвечающей ему, рекомендуемой дидактикой [6] задачной формы представления содержания обучения и проектно-исследовательского метода организации процесса его освоения.

Следуя предлагаемому подходу, подлежащие решению задачи должны систематически, сообразно росту познавательных возможностей обучающихся, усложняться, последовательно приближаясь к задачам, подлежащим решению в реальной профессиональной деятельности.

Развиваемая в работе модель обучения предусматривает в достижении проектируемого результата поэтапность. Первый этап состоит в освоении обучающимися накопленного опыта, базируясь при этом на известных из курса общей физики и находящихся по отношению к ним в ближней зоне знаниях. Здесь необходимо рельефное предметное отражение роли физических представлений в проектировании функциональных элементов электроники и предназначенных для их создания материалов. Предпочтительной формой занятий являются семинары, в процессе подготовки и проведения которых может быть прослежено становление реализуемых подходов к созданию материалов и элементов с требуемыми свойствами [1, 2 ,7].

В качестве проектируемых объектов могут выступать, например, материалы и структуры емкостных и резистивных элементов [8]; решаемых проблемных задач – изыскание на основе фундаментальных знаний возможностей повышения удельной емкости конденсаторов при соблюдении всех других требований к их характеристикам, создания требуемых в плане миниатюризации резистивных элементов материалов, обладающих одновременно высоким удельным сопротивлением и малым его температурным коэффициентом. Спектр охватываемых на семинарских занятиях подходов может включать в себя: в части емкостных элементов – использование в качестве рабочего диэлектрика пленок субмикронных толщин, композитных материалов, создание слоистой металлодиэлектрической конденсаторной

секции с параллельным включением входящих в нее элементов, увеличение площади обкладок посредством развития их поверхности; в части резистивных элементов – применение металлических сплавов, композитных металлодиэлектрических материалов [1, 7, 8].

Принципиально важно обеспечить востребованность максимально возможно самостоятельного конструктивного решения поставленной в проектной форме задачи, как аналитического (оценочные задачи по определению диэлектрической проницаемости и ее температурного коэффициента у композитных материалов, определению емкости конденсатора в зависимости от геометрических параметров развитой поверхности базового электрода [1]), так и численного решения, компьютерного эксперимента, направленного, например, на определение порога протекания в матричных металлодиэлектрических композитах [2, 8].

Уже на первом этапе содержание проводимых семинаров в идейном плане может быть существенно расширено, охватывать целый круг физических эффектов, могущих быть положенными в основу выполнения проектного задания. Пример тому – семинар по определению физических подходов к созданию ограничителя интенсивного лазерного излучения [9, 10].

Затравочным здесь является вопрос о влиянии на спектральную зависимость материалов и структур воздействия на них различных факторов. В поиске ответа на этот вопрос в поле зрения обучающихся попадает широкий круг физических эффектов, индуцируемых неоптическим сигналом и светоиндуцированных эффектов в полупроводниках, бистабильных, проявляющих фазовый переход из неметаллического в металлическое состояние материалах, оптических композитах с диспергированными металлическими и зонально-оболочечными частицами нанометровых размеров, структурах, сформированных из углеродных нанотрубок.

При этом в задачу обучающихся при подготовке к семинару входит не только физическое обоснование целесообразности выбранного варианта решения, но и его критическая оценка на предмет соответствия требованиям к ограничителю, к основным из которых относятся глубина модуляции, быстродействие, габариты и энергопотребление. Это создает основу для проведения на семинаре содержательного сравнительного анализа различных по своим физическим началам решений.

Формирование умений продуктивно действовать в условиях множественности решений может осуществляться и средствами учебного практикума, организуемого в логике проектно-исследовательской деятельности

[9]. Основанием для постановки проектного задания здесь может быть актуализация в практическом плане полученных при выполнении запланированных в практикуме заданий результатов.

Так, при анализе традиционно изучаемой спектральной зависимости оптического поглощения кремнием может быть акцентировано внимание на его фоточувствительности в спектральном диапазоне ультрафиолетового излучения и потребности в регистрации такого излучения в экологии, физиотерапии, биотехнологиях, системах пожарной безопасности. Поскольку сам кремний, как показывает эксперимент, обладает в указанном спектральном диапазоне относительно низкой фоточувствительностью, ставится задача проектирования чувствительных элементов фоторегистрирующих устройств на основе других материалов. В качестве основы знаний для выбора материалов с требуемыми свойствами служат модельные физические представления об оптическом поглощении в полупроводниках, указывающие на необходимость превышения шириной запрещенной зоны порогового для ультрафиолетового спектрального диапазона значения (3,2 эВ). В этой связи в круг представляющих материалов включаются нитрид галлия, оксид цинка, аморфные оксиды ниобия и тантала, мелкокристаллический нитрид алюминия. В отношении возможных структур фотоприемных устройств предпочтение отдается структуре металл-полупроводник с барьером Шотки, в силу прогнозируемой у нее высокой токовой фоточувствительности. Доступность указанных объектов и методик их характеризации позволяет осуществить экспериментальную проверку предлагаемых решений.

На втором этапе уже формулируются задания, выполнение которых требует от обучающихся освоения качественно новых для них, основополагающих в перспективных направлениях электроники и фотоники физических знаний. В этой связи здесь целесообразно использовать лекционную форму обучения, тематически координируя ее с аудиторными практическими занятиями и самостоятельной работой. Наряду с актуальностью, критериями выбора предметного материала должны служить возможность его органичного включения в учебную программу и доступность для освоения, что с необходимостью предполагает опору на ранее освоенный предметный материал.

Реализация этого в практике обучения возможна, во-первых, когда применимы освоенные ранее в смежной области знания подходы и методы. Таковыми, например, являются задания по физике полупроводниковых излу-

чательных элементов на гетероструктурах, применительно к проектированию которых могут быть конструктивно использованы отработанные на гомоструктурах методы электронной зонной инженерии.

Проведению лекции, на которой излагается являющаяся ведущей здесь концепция двойных гетероструктур [11, 12], предшествует самостоятельная работа обучающихся по анализу функциональных возможностей лазеров на гомопереходах, в результате чего они приходят к выводу о существенной ограниченности этих возможностей, в силу высокой пороговой плотности тока. Завершающим в этом цикле занятий может являться семинар, на котором обсуждаются материалы и технологии синтеза классических гетероструктур, а также физические методы контроля их качества.

Другой предпосылкой является возможность получения необходимых для выполнения заданий знаний посредством расширительного анализа ранее освоенных модельных представлений. Выразительным примером таких задания является проектирование на физическом уровне полупроводниковых гетероструктур с наноразмерной активной областью как открывающих возможность еще большего, по сравнению с классическими гетероструктурами, снижения пороговой плотности тока [11, 12]. Вывод о наличии принципиально важного размерного квантования энергии в таких структурах может быть сделан на основе анализа хрестоматийной в преподавании физики модели квантовой частицы в потенциальном ящике при ширине последнего, не превышающей ста нанометров.

Значимой в рассматриваемом аспекте является и возможность привлечения для освоения востребованного нового материала метода аналогий. Так, опираясь на аналогию с уравнением Шредингера для электронов в кристалле уравнения для напряженности магнитного поля в электромагнитной волне, в логике задачного подхода могут быть сформированы представления о наличии фотонных запрещенных зон в структурах с периодически изменяющимся показателем преломления (фотонных кристаллах) [13], а исходя из аналогии с моделью Кронига-Пенни – представления об особенностях энергетического спектра электронов в сверхрешетках.

Наконец, на третьем шаге обучающимся могут быть предложены учебно- и научно-исследовательские задания, методико-технологическое сопровождение которых предусматривает целостность их выполнения с последовательным прохождением всех присущих наукоемкой практикоориентированной деятельности постановочного, ориентационного, исследовательского, примененческого, презентационного этапов.

В том случае, если осуществление постановочного и имитационного этапов требует существенно выходящих за пределы учебной программы знаний, содержание и организация освоения проблематики должны быть адаптированы к образовательному процессу. Это с очевидностью требует от преподавателя глубоких знаний действительного положения дел в рассматриваемом проблемном поле. В этой связи при выборе материала преподавателю целесообразно отдавать предпочтение проблематике собственных исследований, что апробировано в практике обучения с опорой на рад выполненных работ [14-17].

Список используемых источников

1. Ханин С. Д., Хинич И. И. Освоение физики материалов и приборов электронной техники и проблема достижения целостности и результативности исследовательского обучения: Монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И.Герцена, 2009. 108 с.

2. Ханин С. Д., Хинич И. И. Исследовательское обучение физическим основам электроники в подготовке педагогических кадров: Монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И.Герцена, 2009. 127 с.

3. Матюшкин А. М. Психология мышления: мышление как разрешение проблемных ситуаций: Монография. М.: МГУ, 2009. 190 с.

4. Решетова З. А. Психологические основы профессионального образования: Монография. М.: МГУ, 1985. 207 с.

5. Гуляев В. Н. Развитие теории и практики проблемно-деятельностного обучения в высшей военной школе: дисс...докт.пед.наук: 13.00.01 / Гуляев Вдадимир Николаевич. Москва, 2003. 302 с.

6. Сериков В. В. Педагогическая реальность и практическое знание: Монография. М.: Редакц-издат. Дом Российского нового университета, 2018. 299 с.

7. Остроумова Ю. С. Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач. СПб.: ВАС, 2019. 240 с.

8. Смирнов А. А. Взаимосвязь эксперимента, теории и практики в обучении физике конденсированного состояния вещества: дисс...канд.пед.наук: 13.00.02 / Смирнов Андрей Александрович. Санкт-Петербург, 2006. 169 с.

9. Сидоров А. И. Физические основы и методы управления излучением в устройствах интегральной оптики. СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 78 с.

10. Бобринецкий И. И., Герасименко А. Ю., Подгаецкий А. М., Савельев М. С., Светличный В. А., Селищев С. В., Терещенко С. А. Материалы ограничителей интенсивного лазерного излучения на основе углеродных нанотрубок. сб. науч. тр. «Нанотехнологии в электронике» / Под ред. чл.-корр. РАН Ю. А. Чаплыгина. Москва: Техносфера, 2016. С. 89-123.

11. Алферов Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепции и применения в физике, электронике и технологии (Нобелевские лекции по физике) // Успехи физических наук, 2002. Т.172. № 9. С. 1068-1086.

12. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.

13. Остроумова Ю. С., Соловьев В. Г., Ханин С. Д., Яников М. В. Формирование опыта освоения современных перспективных направлений научно-технического разви-

тия на основе фундаментальных знаний в обучении физике. Псков: Псковский государственный университет, 2015. 96 с.

14. Khanin S.D. Kinetic Electronic Phenomena in Metal Oxide Dielectric Films // Material Science Forum, 1995. V. 185-188. P. 563-576.

15. Ханин С. Д. Нанонеоднородность структуры и свойства некристаллических материалов металлооксидной электроники. Монография «Физика и технология наноструктурированных функциональных атериалов» / Под ред. С.Д. Ханина и Ю.А. Кумзерова. СПб.: Издательство Военной академии связи, 2023. С. 301-342.

16. Vanin A. I., Kumzerov Yu. A., Solovyev V. G., Cvetkov A. V., Khanin S. D., Yanikov M. V. Physical Approaches to the Design Functional Metal-Dielectric Systems Based on Opals in Photonics // Technical Physics, 2022. V. 92. № 2. P.232-237.

17. Khanin S. D., Solovyev V. G., Yanikov M. V. Propagation of Electromagnetic Radiation in Opal-based Metal-Dielectric Structures // Horizonts in World Physics, 2023. V. 311. P.55-80.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры Э СПбГУТ, доктором технических наук, профессором С. Д. Ханиным.

CREATING CONDITIONS FOR ACTIVE LEARNING IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF THE PHYSICAL APPROACH TO DESIGN ELEMENTS OF ELECTRONICS AND PHOTONICS

Borisov S.[1], Landa A.[1], Ostroumova Yu.[2], Khanin S.[1], Shumakov P.[1]
[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications
[2]S. M. Kirov Military Medical Academy

Approaches to the formation of design skills at the physical level of electronic and photonic elements and materials for their creation are proposed. A learning model is being developed that prescribes the presentation and development of its content in a task-activity form and the organization of the educational process based on the design and research method. The necessity is argued and the possibilities of implementing step-by-step educational activities aimed at achieving this goal are shown. The article presents proven methodological developments that can be used in the educational process.

Key words: materials and elements of electronics and photonics, physical approach to design, problematic tasks, design and research training, conditions of learning effectiveness

ГРНТИ: 29.19.17
УДК: 538.9

ОСАЖДЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ВХОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СВЕРХПРОНИЦАЕМОЙ МЕМБРАНЫ

А. О. Буснюк, Д. А. Зайцев, С. Р. Кузенов, А. И. Лившиц, Е. Ю. Передистов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Длительное время ведутся исследования явления сверхпроницаемости. Важной характеристикой сверхпроницаемой мембраны (СПМ) является энергетический барьер. В работе рассматривается возможность изменения свойств СПМ посредством осаждения на ее входной поверхности слоя неметаллических примесей с помощью омического нагрева мембраны. Эксперименты проводились на ниобиевой мембране цилиндрической формы, с эффективной площадью ~ 600 см^2. В работе определены основные факторы, влияющие на осаждение примесей. На основании полученных данных разработана и апробирована методика, обеспечивающая стабильное и воспроизводимое осаждение неметаллических примесей на входной поверхности сверхпроницаемой мембраны.

сверхпроницаемые мембраны, водород, энергетический барьер, осаждение примесей

Введение

Развитие управляемого термоядерного синтеза (УСТ) вышло на стадию практической реализации, что подтверждается строительством международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) и разработки демонстрационных термоядерных установок типа DEMO. В связи с развитием УСТ критическую важность приобретает решение прикладных задач. Одной из таких задач является проблема обеспечения замкнутого топливного цикла в установках УСТ. Продуктом реакции термоядерного синтеза между дейтерием (D) и тритием (T) является гелий (He), в который превращаются образующиеся α-частицы. Ключевой особенностью *He* является то, что концентрация данной примеси в плазме не должна превышать 5 % [1]. Следовательно, необходима постоянная откачка *He* из зоны активной плазмы. На данный момент времени, существует только один способ извлечения *He* из плазмы, это непрерывная откачка D/T смеси содержащая небольшое количество *He* из реактора. В современных проектах (таких как ITER) предполагают использование криогенных насосов. Однако они имеют ряд серьезных минусов, основные из них: накопление трития, откачка всех газов без разбора (D/T смеси, *He* и других примесей). После ад-

сорбции газа на криопанелях, их необходимо отвезти на перерабатывающий завод, где будет очищена D/T смесь от *He* и других примесей и впоследствии возвращена обратно в реактор. Ожидается, что данный завод по производству/очистки трития будет вносить наибольший вклад в капитальные затраты установок УТС. Для уменьшения запасов трития, повышения эффективности работы и снижения стоимости необходимо очищать D/T смесь от *He* на более коротком рециркуляционном контуре, возвращая очищенную топливную смесь обратно в реактор, минуя тритиевый завод, известным как «прямая внутренняя рециркуляция» [2]. Концепция предполагает использовать мембраны, сверхпроницаемые по отношению к надтепловым частицам водорода, но непроницаемыми для *He* и других примесей. Сверхпроницаемая мембрана (СПМ) лежит в основе СПМ-насоса [3-4], который выполняет селективную откачку D/T смеси непосредственно на линии откачки дивертора. Задача СПМ-насоса – разделить откачиваемый поток на две фракции, на очищенную D/T смесь и на обогащенную D/T смесь *He* и другими примесями. Первая фракция направляется обратно в реактор (например, посредством инжектирования), вторая фракция отправляется на тритиевый завод для заключительной очистки. Использование концепции «прямого внутреннего рециклинга» закладывает радикальное упрощение системы переработки топливного цикла, сокращение количества запасаемого трития, повышение эффективности будущих установок термоядерного синтеза.

Сверхпроницаемые мембраны изготавливаются из металлов V-группы, таких как: V, Nb, Ta. Металлические мембраны макроскопической толщины могут быть сверхпроницаемы для водородных частиц, если их энергия (кинетическая, химическая или внутренняя) превышает 1 eV [2-5]. Это означает, что практически весь падающий поток надтепловых водородных частиц проходит сквозь мембрану независимо от ее толщины и температуры. В частности, это справедливо для тепловых атомов водорода, имеющих избыток химической энергии (2.2 эВ). За явление сверхпроницаемости и все основные характеристики СПМ отвечает энергетический барьер рекомбинативного выделения абсорбированного водорода, который создается монослойными пленками неметаллических примесей (O, C, S, Se) на поверхности СПМ. Концепция, лежащая в основе явления сверхпроницаемости, может быть проиллюстрирована с помощью потенциальной диаграммы системы водород – металлическая мембрана (рисунок 1).

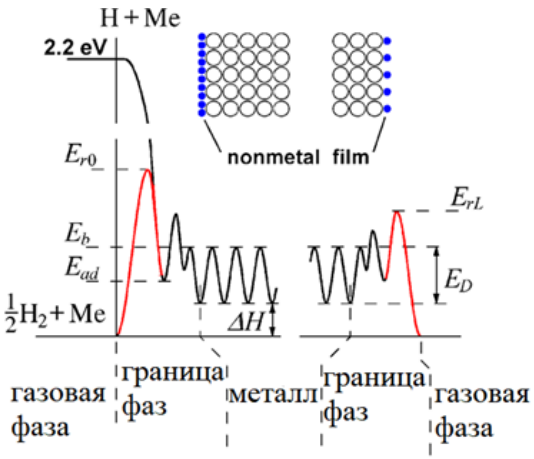


Рис. 1. Потенциальная диаграмма системы водород – металлическая мембрана.

Если энергетический барьер будет недостаточно высоким или отсутствовать, то половина адсорбированного мембраной водорода будет выделяться обратно, на входную поверхность мембраны. Если энергетический барьер на входной поверхности высокий, то практически весь адсорбируемый мембраной водород будет выделяться на выходную сторону. Из это следует, что высота и плотность энергетического барьера ассоциативной термодесорбции напрямую влияет на увеличение скорости мембранной откачки.

Эксперимент

Осаждение неметаллических примесей происходило на ниобиевой мембране, активная площадь которой составляет ~ 600 см2, толщина – 100 мкм [6]. СПМ герметично разделяет установку на два объема, входной и выходной объем. Во входном объеме находится термический источник генерации атомарного водорода. Схема установки приведена на рисунке 2. Неметаллические примеси, такие как O, S, Se наносились *insity*, посредством омического нагрева мембраны.

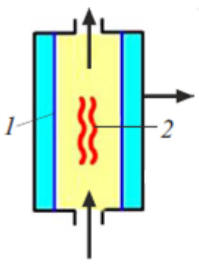


Рис. 2. Схема установки с СПМ.
1- мембрана из Nb; 2- источник генерации атомарного водорода

Посредством омического нагрева СПМ на входную поверхность были осаждены такие неметаллические примеси, как O, S, Se. Кислорода было растворено 1.5 % в теле мембраны. Сера и селен были осаждены посредством пиролиза H_2S и H_2Se при температуре 500 °C. Разложение H_2S и H_2Se было подтверждено с помощью анализатора остаточных газов RGA200. По приблизительным расчетам, было высажено масштаба 10 монослоев неметаллических примесей S, Se.

На рисунке 3 приведены кривые зависимости вероятности проникновения молекулярного водорода через СПМ при различных температурах и в присутствии различных неметаллических примесей. Черным цветом отмечена вероятность проникновения водорода в начальном состоянии СПМ. Красным ромбом – вероятность проникновения с растворенным водородом. Синими звездами – после осаждения селена. Пурпурный квадрат – вероятность проникновения после осаждения серы.

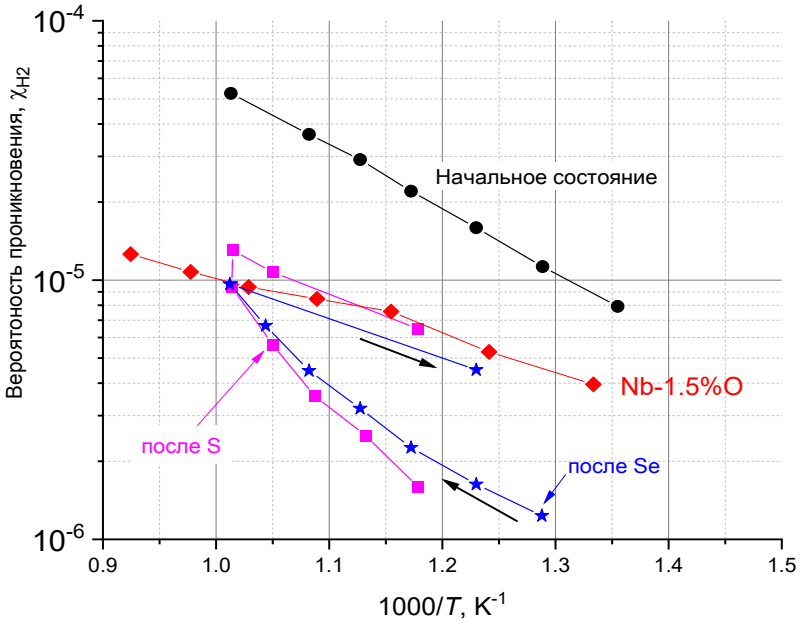


Рис. 3. Зависимости вероятности проникновения молекулярного водорода через СПМ

Как можно заметить, вероятность проникновения молекул водорода сквозь СПМ при осаждении серы и селена ведут себя схожим образом и вероятности существенно меньше, чем при начальном состоянии СПМ. Стоит обратить внимание, на то, что присутствует гистерезис, при увеличении температуры. Вероятность проникновения в случае растворенного кислорода, не имеет гистерезиса, но значительно больше при низких температурах, относительно осажденного селена или серы.

Выводы

В ходе исследования было экспериментально подтверждено, что осаждение неметаллических примесей является эффективным методом модификации поверхности сверхпроницаемых мембран. Осаждение неметаллических примесей способствует увеличению барьера ассоциативной термодесорбции, что в свою очередь оказывает положительное влияние на характеристики мембраны. Разработана и апробирована методика, обеспечивающая стабильное и воспроизводимое осаждение неметаллических примесей на входной поверхности сверхпроницаемой мембраны.

Список используемых источников

1. Peters B. J., Hanke S., Day C. Metal foil pump performance aspects in view of the implementation of direct internal recycling for future fusion fuel cycles // Fusion Engineering and Design. 2018. Vol. 136. Pp. 1467–1471.

2. Livshits A. I. et al. Superpermeability to Fast and Thermal Hydrogen Particles: Applications to the Pumping and Recycling of Hydrogen Isotopes // Journal of Nuclear Materials. 1992. Vol. 196–198. Pp. 159–163.

3. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A. Physico-Chemical Origin of Superpermeability-Large-Scale Effects of Surface Chemistry on «Hot» Hydrogen Permeation and Absorption in Metals // Journal of Nuclear Materials. 1990. Vol. 170. Pp. 74–94.

4. Livshits A. I. Superpermeability of Solid Membranes and Gas Evacuation, Part I. Theory // Vacuum. 1979. Vol. 29. № 3. P. 103.

5. Livshits A. I., Notkin M. E., Pistunovich V. I. et al. Superpermeability: critical points for applications in fusion // Journal of Nuclear Materials. 1995. Vol. 220–222. Pp. 259–263.

6. Передистов Е. Ю., Буснюк А. О., Алимов В. Н. и др. Демонстрация возможности селективной откачки D/T-смеси в установках управляемого термоядерного синтеза с помощью сверхпроницаемых мембран // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. № 2. С. 44–46.

DEPOSITION OF NON-METALLIC IMPURITIES ON THE INLET SURFACE OF A SUPERPERMEABLE MEMBRANE

Busnyuk A., Zaitsev D., Kusenov S., Livshits A., Peredistov E.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The phenomenon of superpermeability has been studied for a long time. An important characteristic of a superpermeable membrane (SPM) is its energy barrier. This study examines the possibility of modifying the properties of SPMs by depositing a layer of non-metallic impurities on their inlet surface using ohmic heating of the membrane. Experiments were conducted on a cylindrical niobium membrane with an effective area of ~600 cm2. The study identified the main factors influencing impurity deposition. Based on the data obtained, a method was developed and tested that ensures stable and reproducible deposition of non-metallic impurities on the inlet surface of a superpermeable membrane.

Key words: superpermeable membranes, hydrogen, energy barrier, impurity deposition

УДК 621.396.99
ГРНТИ 49.33.29

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г. В. Верхова, В. А. Летучий

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрены методы формирования метрологических киберфизических систем на основе цифровых двойников киберфизических производственных систем с акцентом на корректное представление измерений. Показано, что ключевой методический риск связан с интерпретацией измерений как «истинных» значений без учета неопределенности и состояния средств измерений. Обоснована необходимость интеграции в архитектуру цифрового двойника моделей датчиков, параметризуемых по данным калибровки, и процедур, обеспечивающих прослеживаемость и воспроизводимость результатов.

цифровой двойник, киберфизическая производственная система, датчики, метрология, неопределенность, калибровка, DCC, edge–cloud

Формирование метрологических киберфизических систем целесообразно определять как развитие цифровых двойников киберфизических производственных систем в сторону метрологически корректного наблюдения и принятия решений. В типовой инженерной архитектуре цифрового двойника основное внимание уделяется моделям технологического объекта и контуру синхронизации, тогда как измерительная подсистема часто редуцируется до канала телеметрии [1, 2, 4]. Для метрологической киберфизической системы такая редукция принципиально недостаточна, поскольку достоверность цифровых оценок состояния, качества продукции и диагностических выводов определяется не только адекватностью модели объекта, но и метрологическим статусом измерений: погрешностью, неопределенностью, влияющими величинами, деградацией и актуальностью калибровочных параметров. Архитектурной основой распределенных КФПС является структурное представление состава активов и связей, позволяющее связать модели объекта и модели измерительных каналов с конкретными узлами системы. Формально КФПС описывается ориентированным графом:

$$G = (V, E) \quad (1)$$

где $V = \{1, \dots, N\}$– множество активов (оборудования, роботов, узлов), а $E \subseteq V \times V$– множество связей между ними.

В метрологическом контексте эта модель важна тем, что обеспечивает «привязку» измерений к структуре: разные вершины/ребра могут иметь различные классы точности, условия эксплуатации и режимы калибровки, а значит агрегирование данных и диагностика должны учитывать неоднородность метрологических свойств по сети.

Динамика КФПС в обобщенной форме задается уравнением состояния:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), d(t); G, \theta) \quad (2)$$

где $u(t)$ – управляющие воздействия, $d(t)$ – возмущения, θ – параметры оборудования и процессов.

Методически это выражение фиксирует, что качество цифрового двойника определяется выбранным классом моделей $f(\cdot)$. Непрерывные физические модели дают интерпретируемость, дискретно-событийные – адекватность логике потоков, гибридные – компромисс для производственных систем. Однако независимо от класса $f(\cdot)$ метрологическая состоятельность цифрового двойника достигается только при корректной трактовке наблюдений, цифровое состояние должно оцениваться по измерениям как по реализациям случайных величин, а не как по «истинным» данным.

Ключевой элемент метрологической постановки – модель наблюдений. Измерение представляется как функция состояния с добавлением шумовой/неопределенной составляющей:

$$y(t) = h\big(x(t)\big) + v(t) \quad (3)$$

где $h(\cdot)$ задает оператор измерения (включая преобразование единиц, нелинейность, динамику канала), а $v(t)$ отражает неопределенность результата измерения [5, 6]. Для метрологических киберфизических систем принципиально, что $v(t)$ не должен задаваться «по умолчанию» как абстрактный стационарный шум, структура и параметры неопределенности должны быть связаны с конкретным средством измерений, его состоянием и условиями применения. В противном случае расхождение между моделью и данными будет интерпретироваться некорректно, цифровой двойник начнет «обучаться» на ошибках измерительного канала и переносить их в оценку состояния и прогнозы [3, 6].

На уровне методов формирования метрологической киберфизической системы центральным является выделение цифрового двойника датчика/из-

мерительного канала как самостоятельного объекта цифрового представления [1, 2, 3]. Общая модель датчика задается зависимостью выходного сигнала от измеряемой величины, параметров датчика и влияющих величин:

$$y(t) = F\big(x(t), \theta_s, \xi(t)\big) \tag{4}$$

где $x(t)$ – измеряемая физическая величина, θ_s – вектор параметров датчика (чувствительность, коэффициенты преобразования, временные постоянные), а $\xi(t)$ – вектор влияющих величин (температура окружающей среды, вибрации, напряжение питания и др.)

Эта модель задает требуемую «метрологическую онтологию», данные зависят не только от объекта измерения, но и от параметров средства измерений и условий. Следовательно, в архитектуре системы должны быть предусмотрены хранение θ_s, границы действительности (условия, при которых параметры получены), а также механизмы актуализации параметров по результатам метрологических процедур. Именно это отличает метрологическую киберфизическую систему от обычной системы мониторинга, где измерение воспринимается как значение состояния.

Важный аспект метода – учет деградации и дрейфа характеристик датчика, поскольку в длительной эксплуатации систематическое изменение параметров может имитировать изменение объекта. Простейшая модель дрейфа чувствительности:

$$k(t) = k_0 + \beta t \tag{5}$$

При наличии дрейфа цифровой двойник, не содержащий модели датчика, будет формировать смещенные оценки состояния и пороговые решения (например, годность/негодность) с ростом риска ошибок. Поэтому мониторинг дрейфа и отделение изменения объекта от изменения средства измерений должны рассматриваться как обязательный методический компонент метрологической киберфизической системы.

Параметризация цифрового двойника датчика по данным калибровки обеспечивает связь цифровой модели с прослеживаемыми результатами метрологических процедур и формирует основание для вычисления неопределенности. Взвешенная постановка оценивания параметров представляется задачей:

$$\hat{\theta} = arg\min_{\theta} \sum_{i=1}^{N} \big(y_i - f(x_i, \theta)\big)^T W_i \big(y_i - f(x_i, \theta)\big) \tag{6}$$

где W_i отражает вклад неопределенности калибровочных данных и повторяемости измерений. Методический смысл заключается в том, что параметры $\hat{\theta}$ приобретают не просто вычислительный, а метрологический статус – они связаны с регламентированным экспериментом и могут сопровождаться оценкой неопределенности, областью применимости и версией калибровки.

Для автоматизации это создает предпосылку к машинно-обрабатываемому переносу результатов калибровки в цифровую конфигурацию, что повышает воспроизводимость и аудитируемость решений [7].

Наличие модели погрешности/неопределенности в цифровом двойнике датчика фиксируется представлением результата измерения как суммы модели преобразования и функции погрешности, зависящей от параметров и условий:

$$y = f(x, \theta) + \varepsilon(\theta, \xi) \quad (7)$$

В рамках метрологической киберфизической системы это означает переход от точечного измерения к измерению как величине, сопровождаемой неопределенностью, причем эта неопределенность изменяется при изменении состояния датчика и условий эксплуатации. Практический эффект – возможность корректного принятия решений вблизи порогов (контроль соответствия, диагностика, прогноз), а также обеспечение прослеживаемости, цифровой двойник может воспроизводить результаты для заданной версии модели, параметров и условий.

Для наглядного сопоставления рассмотренных подходов целесообразно перейти от качественного описания к структурированному сравнительному анализу. Поскольку методы формирования метрологических киберфизических систем различаются по объекту цифрового представления (система, измерительный канал, процедура), степени формализации измерительного процесса, способам параметризации по калибровочным данным и наличию механизма учета неопределенности и дрейфа, их корректнее оценивать по единому набору критериев. В таблице 1 приведено сравнение основных классов подходов.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная таблица существующих методов.

Класс подходов	Сущность метода	Основные достоинства	Принципиальные недостатки
Модели КФПС (непрерывные, дискретные, гибридные)	Моделирование поведения технологических объектов и процессов	Описывают динамику и логику производства	Измерения трактуются как истинные значения; отсутствует модель измерительного процесса
Физико-математические модели датчиков	Описание преобразования физической величины в сигнал	Учитывают физику и динамику датчиков	Ориентированы на отдельные типы датчиков; не образуют универсального формализма
Частные цифровые двойники датчиков	Цифровые модели конкретных средств измерений	Учитывают параметры и деградацию	Не обладают универсальностью для разных типов физических величин
Цифровизация калибровки (DCC)	Машинно-читаемые сертификаты	Формализуют результаты калибровки	Не обеспечивают универсальной модели измерительного процесса
ЦД КФПС без метрологии	Цифровые двойники объектов и процессов	Эффективны для управления и оптимизации	Не учитывают метрологический статус измерений

Заключение

Метрологическая киберфизическая система принципиально отличается от цифрового двойника КФПС тем, что измерение рассматривается как результат регламентированного процесса со своей моделью, неопределенностью и жизненным циклом средства измерений. Методологически обосновано, что переход к такой системе требует выделения цифрового двойника датчика, параметризуемого по калибровочным данным во взвешенной постановке и содержащего модель погрешности, зависящей от параметров и условий эксплуатации. Реализация указанного подхода обеспечивает прослеживаемость данных, воспроизводимость цифровых оценок и снижение риска ошибочных решений в задачах управления, диагностики и контроля соответствия.

Список используемых источников

1. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Digital twin in industry: State-of-the-art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2022. Т. 18, № 6. С. 3699–3713.

2. Kritzinger W. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. 2021. Т. 54, № 1. С. 1–6.

3. Zhang J., Wortmann A. Uncertainty in digital twins: A systematic review // Advanced Engineering Informatics. 2022. T. 54. Art. 101762.

4. ISO 23247:2021. Automation systems and integration – Digital Twin framework for manufacturing. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

5. Joint Committee for Guides in Metrology. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM): JCGM 200:2012. Sèvres: BIPM, 2012.

6. Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM): JCGM 100:2008. Sèvres: BIPM, 2008.

7. Eichstädt S., Kok G. Digital calibration certificates // Metrologia. 2021.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры САР СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Г. В. Верховой.

ANALYSIS OF METHODS FOR THE FORMATION OF METROLOGICAL CYBERPHYSICAL SYSTEMS

Verkhova G., Letuchy V.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

Methods of forming metrological cyberphysical systems based on digital counterparts of cyberphysical production systems with an emphasis on the correct representation of measurements are considered. It is shown that the key methodological risk is associated with the interpretation of measurements as «true» values without taking into account uncertainty and the condition of measuring instruments. The necessity of integrating sensor models parameterized by calibration data and procedures ensuring traceability and reproducibility of results into the architecture of the digital twin is substantiated.

Key words: digital twin, cyber–physical production system, sensors, metrology, uncertainty, calibration, DCC, edge-cloud

УДК 004.946
ГРНТИ 28.19.27

АГЕНТНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ КИБЕРСРЕДАХ

Г. В. Верхова, А. Ю. Суетин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается проблема обеспечения семантической интероперабельности в децентрализованных киберсредах с динамической структурой связей, характерных для ad-hoc сетей и летающих ad-hoc сетей в сценариях поисково-спасательных операций Urban Search and Rescue. Предлагается агентно-онтологическая трактовка интероперабельности, в которой согласование смыслов достигается за счет использования общей (или сопоставимой) онтологической модели предметной области и процедур семантического сопоставления понятий/ролей/действий между узлами сети.

семантическая интероперабельность, агентный подход, онтологии, ad-hoc сети, FANET, USAR, Box2EL, релевантность, кластеризация

Сценарии реагирования на чрезвычайные ситуации требуют быстрого развертывания распределенных систем наблюдения и управления, где узлы сети могут появляться и исчезать, а каналы связи быть нестабильными. В USAR особенно востребована совместная работа воздушных и наземных платформ (UAV–UGV) [1, 2], поскольку задачи поиска, разведки и доставки ресурсов разделяются по средам и ресурсным возможностям. При этом «техническая» совместимость протоколов недостаточна: участникам нужно одинаково интерпретировать данные о целях, задачах, координатах, объектах среды и доступных действиях, то есть обеспечить семантическую интероперабельность [3].

Ключевая сложность ad-hoc/FANET состоит в отсутствии центрального узла согласования и в постоянной перестройке топологии, из-за чего семантическое согласование должно выполняться распределенно и с минимальной задержкой. Поэтому актуален агентный подход: каждый участник выступает автономным агентом, который способен представлять знания, обмениваться ими и принимать решения о взаимодействиях на основе локально доступной информации [3].

Объектом исследования является киберсреда, формируемая ad-hoc сетью, включающей разнородные узлы (например, UAV и UGV), выполняющие задачи USAR и обменивающиеся данными/командами в реальном времени. На уровне смыслов требуется обеспечить совместимость сообщений о: типах платформ, сенсорах, задачах (поиск, спасение и т.п.), положении в пространстве (включая геопривязку), среде выполнения и статусах миссии. Задача формулируется как построение метода, который позволяет агентам: описывать знания в единой онтологической форме, вычислять семантическую близость/релевантность между объектами и сообщениями, использовать вычисленные оценки для выбора взаимодействий и структурирования сети (например, через кластеризацию) с учетом QoS-ограничений.

В рамках исследуемого подхода управление роем беспилотных летательных аппаратов рассматривается не только в физическом, но и в кибернетическом пространстве, где каждый дрон имеет программное агентное представление. Такое «высвобождение» дополнительного пространства состояний позволяет перенести значительную часть координации и принятия решений в децентрализованную киберсреду, сохранив за физическими устройствами роль исполнительного уровня. Подобная двухуровневая организация согласуется с современными концепциями цифровых двойников и мультиагентных кибер-физических систем, обеспечивающих гибкость и масштабируемость управления гетерогенными робототехническими комплексами. Предлагаемая концепция вводит дополнительный уровень абстракции – киберсреду, в которой физические дроны представлены программными агентами. Данный подход основан на принципах цифровых двойников, где каждому физическому устройству соответствует его виртуальное представление в цифровом пространстве [4].

Формирование интероперабельного семантического ядра для ad-hoc сетей начинается с построения формализованной структуры, включающей онтологии, метаданные и механизмы семантического сопоставления. Онтологии выступают в роли формальных моделей, описывающих ключевые концепции предметной области, их свойства и взаимосвязи [5]. Например, в геопространственных ad-hoc сетях онтология может содержать понятия, такие как «точка интереса», «температура», «время суток», что позволяет унифицировать интерпретацию разнородных данных между узлами сети. Метаданные, в свою очередь, обеспечивают описание контекста данных, включая временные, пространственные и тематические характеристики, что

критически важно для корректной агрегации и анализа информации в динамично изменяющейся среде ad-hoc сетей.

Для формализации знаний используется онтологическая модель с компонентами «классы–отношения–аксиомы», применимая к домену USAR. В качестве примеров классов и отношений в материале фигурируют сущности наподобие Drone (с подтипами AerialDrone и GroundDrone), Task, Environment, а также отношения вида hasSensor, performsTask, locatedIn, communicatesWith. Такая онтология выступает «общим словарем» для агентов и позволяет выразить, что, например, конкретная платформа выполняет определенный тип задач и имеет сенсорные возможности, значимые для кооперации.

Агентная трактовка важна тем, что согласование смыслов становится частью принятия решений: агент должен сопоставить собственные понятия с понятиями партнера и определить, насколько предложения/сообщения релевантны текущей цели. В децентрализованной среде это означает, что методы сопоставления должны быть вычислительно приемлемыми и работать при частичной общности онтологий или различиях в детализации.

Центральный элемент предлагаемого подхода – переход от символического онтологического описания к вычислимым метрикам сходства между концептами, ролями и утверждениями. В предлагаемом подходе рассматривается способ семантического сопоставления концептов, в котором элементы онтологии в логике описаний EL отображаются в «коробочные» представления (box embeddings), что связывается с методом Dual Box Embeddings for the Description Logic EL (Box2EL). В таком представлении сходство концептов может оцениваться через степень пересечения/вложенности «коробок» и производные метрики, позволяющие сравнивать пары понятий [6]. Далее вводится идея вычисления релевантности: агенту нужно оценить, насколько концепт/сообщение/партнер соответствует запросу или цели миссии, а не просто «похож» в абстрактном смысле. Релевантность может агрегировать семантическую близость по онтологическим признакам и учитывать контекст (например, текущую задачу, тип платформы и доступные ресурсы).

Для использования в сети результаты семантического сопоставления естественно превращаются в критерий группирования: узлы и их предложения можно объединять в кластеры по близости смыслов (задач, ролей, функций, сервисов). Такая кластеризация поддерживает более устойчивую коммуникацию, поскольку обмен в пределах кластера снижает избыточные ши-

роковещательные рассылки и повышает вероятность, что сообщения будут интерпретированы одинаково.

Вместе с кластеризацией, семантический подход дает возможность реализации семантической маршрутизации, которая представляет собой подход, при котором при передаче информации учитываются смысловые аспекты данных, а не только топологические характеристики сети. Критерии выбора маршрута основываются на релевантности узлов содержанию запроса, что позволяет направлять данные через наиболее подходящие для обработки или хранения узлы. Адаптивные протоколы маршрутизации обновляют маршруты в реальном времени, реагируя на изменения в составе и состоянии сети, что особенно важно для обеспечения надежности и минимизации задержек в высокодинамичных ad-hoc сетях. Такой подход обеспечивает не только эффективную доставку данных, но и поддерживает высокий уровень качества обслуживания за счет интеллектуального выбора маршрутов с учетом семантики и текущего состояния сети [7].

Основной результат метода – возможность формализовать смысловую совместимость как вычислимую величину, пригодную для децентрализованных решений в динамической ad-hoc среде. Это делает семантическую интероперабельность не отдельной «надстройкой», а встроенным критерием выбора коммуникаций и распределения задач между UAV и UGV в USAR. Вместе с тем практическая применимость зависит от качества онтологической модели домена, согласованности терминов и вычислительных затрат, что в условиях ограниченных ресурсов и нестабильной связи требует аккуратного проектирования.

Семантическая интероперабельность в децентрализованных ad-hoc киберсредах USAR может обеспечиваться через агентно-онтологическое представление знаний и вычислимые метрики семантической близости/релевантности. Использование представлений уровня Box2EL позволяет опираться на формальные онтологии и одновременно применять вычислительные процедуры сравнения, что важно для real-time взаимодействий в FANET и смешанных UAV–UGV сетях. Комбинация семантических критериев с QoS-ограничениями дает основу для выбора партнеров, маршрутов и кластеров взаимодействий в динамических условиях спасательных операций.

Список используемых источников

1. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years // Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 2020. 30 c.
2. Tsang, HH., Daniell, J.E., Wenzel, F. et al. A universal approach for evaluating earthquake safety level based on societal fatality risk, 2019. С. 273–296
3. Munasinghe I., Perera A., Deo R. A Comprehensive Review of UAV-UGV Collaboration: Advancements and Challenges. 2024. 26 c.
4. Суетин А. Метамодель интероперабельной киберсреды, основанной на агентном подходе // материалы конференции ПКМ-2025. 2025. С. 350-354
5. Nundloll V., Grace P., Blair G. The Role of Ontologies in Enabling Dynamic Interoperability // Lecture Notes in Computer Science. 2011. С. 179-193.
6. Mathias J., Jiaoyan C., Horrocks I. Dual Box Embeddings for the Description Logic EL++ // The ACM Web Conference. 2024. С. 2250-2258.
7. Bakshi K. Considerations for Software Defined Networking (SDN): Approaches and use cases // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2013. С. 1-14.

AGENT-BASED APPROACH TO ENSURE SEMANTIC INTEROPERABILITY IN DECENTRALIZED CYBER ENVIRONMENTS

Verkhova G., Suetin A.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

This paper examines the problem of ensuring semantic interoperability in decentralized cyber environments with a dynamic link structure, typical of ad-hoc networks and flying ad-hoc networks in Urban Search and Rescue scenarios. An agent-ontological approach to interoperability is proposed, in which the alignment of meanings is achieved through the use of a common (or comparable) ontological model of the subject area and procedures for semantic mapping of concepts/roles/actions between network nodes.

Key words: semantic interoperability, agent-based approach, ontologies, ad-hoc networks, FANET, USAR, Box2EL, relevance, clustering

УДК 004.891
ГРНТИ 28.23.35

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ ТУРИСТИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ НА ОСНОВАНИИ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Г. В. Верхова, А. С. Чернышов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается подход к автоматизации процесса построения туристических маршрутов на основе многоагентной архитектуры и геоинформационных данных. Предлагается многоэтапная архитектура, основанная на цепочке специализированных ИИ-агентов, выполняющих классификацию запроса, извлечение геоинформационных объектов из различных текстовых источников, проверку наличия данных в векторной базе, формирование запросов к ГИС и отрисовку маршрутов на карте. Показано, что предлагаемый подход позволяет снизить долю ручного труда пользователя, автоматизировать подготовку маршрутов и взаимодействие с геоинформационными системами.

извлечение данных, языковые модели, ИИ-агенты, геоинформационные системы, OpenStreetMap, маршрутизация

Процесс планирования маршрута, как правило, включает анализ большого объема неструктурированной информации: статей, рекомендаций, пользовательских отзывов, картографических материалов и собственных заметок. На основе этих данных пользователь вручную формирует маршрут, что особенно затруднительно в незнакомой местности. Дополнительные сложности связаны с необходимостью постоянной ориентации на карте, учета пересадок, расписаний транспорта и пространственных ограничений. С учетом указанных факторов актуальной является задача разработки интеллектуальной системы, способной автоматизировать часть процессов планирования маршрута. В качестве технологической основы для такой системы целесообразно использовать языковые модели, обладающие возможностями обработки естественного языка и извлечения смысловых сущностей из текстов [1, 2].

Построение туристического маршрута представляет собой комплексную задачу, зависящую от множества факторов: расстояния между объектами, времени в пути, доступности и типа транспорта, а также индивидуальных предпочтений пользователя. При этом непосредственное вычисление оптимального маршрута между двумя географическими точками в значительной степени определяется возможностями и наполненностью геоинформационных систем.

Такие системы, как OpenStreetMap, содержат данные о дорожной сети, пешеходных маршрутах, линиях общественного транспорта, однако требуют корректно сформированных запросов. Использование искусственного интеллекта в данном контексте целесообразно не для замены алгоритмов маршрутизации, а для подготовки и структурирования входных данных для ГИС.

Основная задача исследования заключается в разработке методики извлечения геоинформационных объектов из текстовой информации таким образом, чтобы они максимально соответствовали запросу. Это позволяет автоматизировать рутинные операции, сохранив за пользователем аналитические и творческие решения. Дополнительной особенностью является универсальность маршрутов: система должна поддерживать как внутригородские, так и межгородские маршруты.

В рамках данного исследования используется агентный подход. Под ИИ-агентом понимается автономный программный компонент, использующий языковую модель для выполнения строго определенной функции в рамках общей системы [3]. Агент получает на вход текстовые или структурированные данные, обрабатывает их в соответствии со своей ролью и передает результат следующему агенту.

В рамках системы реализованы следующие типы агентов:

1. Агент планировщик маршрута. Использует языковую модель для семантического анализа запроса пользователя и определяет тип маршрута: внутригородской, межгородской или смешанный. Новизна данного агента заключается в отказе от жестких правил и ключевых слов в пользу контекстной интерпретации пользовательского текста.

2. Агент-маршрутизатор. Агент анализирует сложные запросы, содержащие элементы как внутригородской, так и междугородней логистики. Его ключевая задача – определить источник данных для построения маршрута. Помимо классификации, агент формирует два логически связанных текстовых представления маршрута и восстанавливает недостающие связи между его частями, используя языковую модель.

3. Агент поиска и генерации получает на вход данные от Агента 2 и работает по принципу RAG (Retrieval-Augmented Generation) [4]. Он выполняет поиск релевантной информации в векторной базе данных, а при необходимости обращается к заметкам пользователя или веб-ресурсам. В процессе обработки агент сопоставляет извлеченные геоинформационные объекты с имеющимися данными.

4. Агент валидации и структурирования ответа. Данный агент выполняет двойную функцию. Во-первых, он проверяет успешность выполнения запросов к базе данных и валидирует извлеченные объекты на предмет

их релевантности исходному запросу. Во-вторых, агент преобразует неструктурированный текст в строго формализованный список геоинформационных объектов, подготавливая структуру данных для дальнейшей работы картографического сервиса.

5. Агент генерации запросов к OpenStreetMap и построения маршрута. На основе формализованного и валидированного списка объектов агент автоматически формирует корректный запрос к OSM для последующей отрисовки маршрута на карте.

Таким образом, языковая модель используется не как универсальный генератор ответов, а как инструмент семантического анализа и преобразования данных на каждом этапе цепочки (рисунок 1).

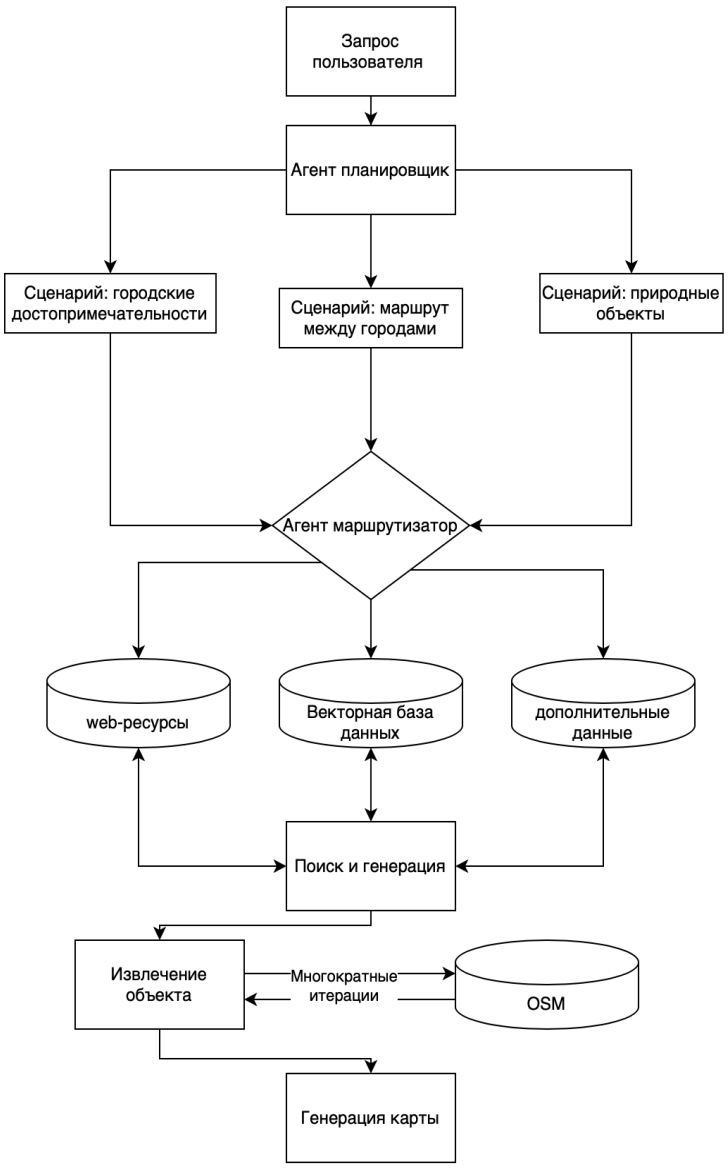


Рис. 1. Архитектура системы автоматизированного построения маршрутов по текстовым данным

После реализации предложенной архитектуры было проведено тестирование на различных типах запросов. Система обрабатывала как маршруты по пользовательским заметкам («Автомобильный маршрут по Калининградской области», рисунок 2), так и запросы с привлечением внешних веб-источников («Значимые места по пути из Осаки в Токио», «Маршрут с достопримечательностями в Санкт-Петербурге»).

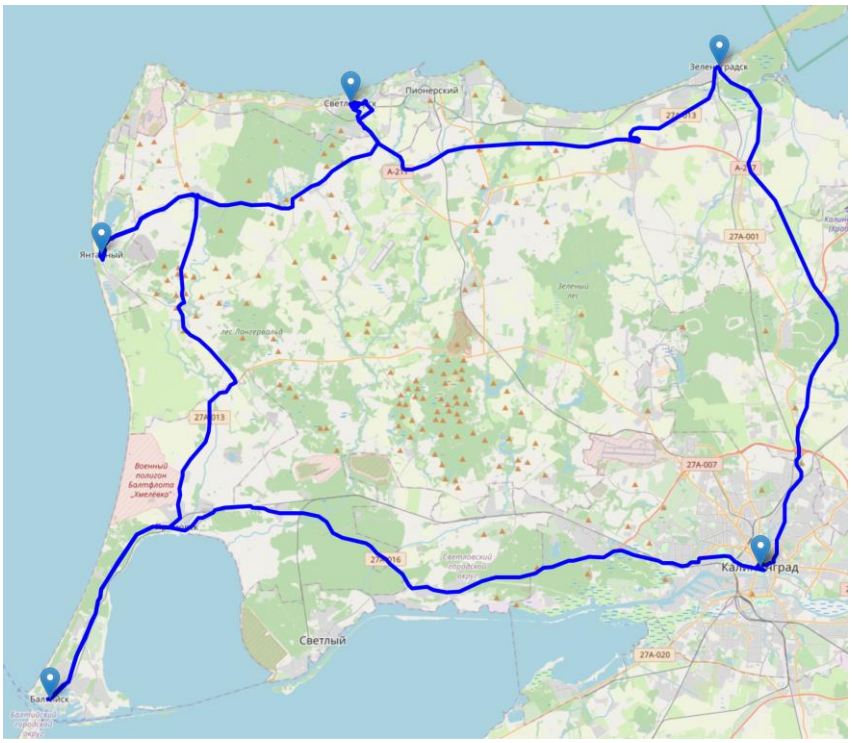


Рис. 2. Построение автомобильного маршрута по Калининградской области по запросу пользователя

Тестирование подтвердило принципиальную работоспособность предложенного подхода: агенты корректно взаимодействуют между собой, обеспечивая сквозную обработку запроса – от определения источника данных до генерации структурированного запроса в OpenStreetMap. Вместе с тем, в ходе испытаний были выявлены сценарии (противоречивые данные, редкие топонимы), требующие дополнительной валидации и тонкой настройки. Таким образом, архитектура демонстрирует работоспособность базового функционала, но нуждается в дальнейшей калибровке для повышения надежности результатов.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования ИИ в задачах извлечения геоданных из текста и построения маршрутов. Использование цепочки агентов позволяет разделить сложную задачу на по-

следовательность более простых подзадач, повысить интерпретируемость системы и упростить масштабирование и модификацию архитектуры.

Список используемых источников

1. Brown T. B., Mann B., Ryder N. et al. Language Models are Few-Shot Learners // arXiv. 2020. arXiv:2005.14165. URL: https://arxiv.org/abs/2005.14165 (дата обращения: 31.10.2025).

2. Верхова В. Г., Чернышов А. С. Исследование возможности применения большой языковой модели для решения задач пространственного анализа // 5-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025): сб. науч. ст. СПб.: СПбГУТ, 2025.

3. Gulli A. Agentic Design Patterns: A Hands-On Guide to Building Intelligent Systems. Springer, 2024. 412 p.

4. Lewis P., Perez E., Piktus A. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // arXiv. 2020. arXiv:2005.11401. URL: https://arxiv.org/abs/2005.11401 (дата обращения: 15.01.2026).

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AGENT SYSTEM FOR AUTOMATING TOURIST ROUTE PLANNING BASED ON LARGE LANGUAGE MODELS

Verkhova G., Chernyshov A.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents an approach to automating the process of tourist route planning based on a multi-agent architecture and geoinformation data. A multi-stage architecture is proposed, built on a chain of specialized AI agents that perform query classification, extraction of geoinformation objects from various text sources, verification of data availability in a vector database, generation of GIS queries, and route visualization on a map. It is demonstrated that the proposed approach reduces the need for manual user input, automates route preparation, and facilitates interaction with geoinformation systems.

Key words: data extraction, language models, AI agents, geoinformation systems, OpenStreetMap, routing

УДК 519.876.5
ГРНТИ 20.53.23

ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ V2X НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

А. Г. Владыко, П. В. Плотников, Г. И. Тамбовцев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается метод проактивного управления мобильной вычислительной инфраструктурой (mRSU) в сетях V2X на основе глубокого обучения с подкреплением. Основное внимание уделено предиктивному контролю ускорения и скорости узла для компенсации зон потери сигнала и динамических пиков вычислительной нагрузки. Показано, что использование алгоритма машинного обучения, позволяют сократить среднюю задержку обработки данных более чем в два раза и практически полностью исключить нарушение временных ограничений в сравнении с реактивными стратегиями. Результаты подтверждают преимущество предиктивного позиционирования вычислительных ресурсов в условиях динамичного транспортного потока.

V2X, mRSU, обучение с подкреплением, проактивное управление, предиктивное позиционирование, интеллектуальные транспортные системы.

Введение

Традиционные стационарные RSU обладают фиксированным радиусом покрытия, что приводит к неэффективному использованию ресурсов при неравномерном распределении транспортного потока. Эту проблему решает внедрение мобильных вычислительных узлов (mRSU) [1] способных следовать за «волнами» трафика и расширять зоны с низким покрытием или перегрузкой вычислительных ресурсов. Однако, реактивное движение оказывается неэффективным в условиях наличие зон с высоким затуханием и резком изменение интенсивности поступающих от бортовых устройств (OBU) задач. В условиях высокой динамики, классические реактивные подходы сталкиваются с проблемой запаздывания. Это означает, что к моменту, когда система фиксирует деградацию качества обслуживания [2] (QoS) и начинает реагирование, значительная часть критически важных задач уже нарушает установленные предельные временные ограничения.

Для преодоления этих ограничений необходимо проактивное управление мобильностью. Оно подразумевает способность системы прогнозиро-

вать пространственно-временную динамику трафика и заранее корректировать траекторию mRSU, обеспечивая избыточное покрытие в прогнозируемых «узких местах» еще до фактического возникновения пиковой нагрузки.

Реализация такого управления может быть затруднена из-за высокой размерности пространства состояний и стохастической природы V2X-среды. В связи с этим, перспективным решением представляется использование обучения с подкреплением (RL) [3]. Методы обучения с подкреплением позволяют агенту самостоятельно выявлять скрытые закономерности в движении транспортного потока и характеристиках радиоканала, формируя оптимальную стратегию ускорения на основе накопленного опыта, без необходимости построения точных аналитических моделей среды.

Постановка задачи

Рассматривается сегмент дорожной сети, по которому движется группа транспортных средств (OBU). Мобильный вычислительный узел (mRSU) должен обеспечивать максимальное качество обслуживания (QoS) для этого потока. Эффективность системы зависит от того, насколько точно пространственное положение mRSU соответствует динамически меняющемуся «центру масс» вычислительной нагрузки.

Стратегическое управление осуществляется за счет выбора маршрута mRSU. На графе дорожной сети выбирается набор из целевых узлов. Данный подход эффективен для планирования долгосрочного маршрута, но он обладает слишком низкой детализацией. На длинном перегоне между двумя узлами графа (например, 2 км) mRSU может безнадежно отстать от группы OBU или «проскочить» зону помех, так как модель графа не учитывает динамику внутри ребра.

При автономном локальном управлении, как и следует из названия, решения принимаются локально, основываясь на данных своих сенсоров. За счет этого, можно принимать решения о поддержании дистанции до ближайшего автомобиля (OBU) или ускорении, обгоне. Такой подход не учитывает информацию о плотности трафика за пределами радиуса видимости сенсоров и не обладает знаниями о предстоящих «чувствительных» зонах (например, зон радиопомех).

Наиболее перспективным является переход к управлению динамическими характеристиками – скоростью и ускорением. Это позволяет системе работать в непрерывном пространстве действий, обеспечивая «плавное» следование за вычислительным спросом. Состояние системы в дискретные

моменты времени t описывается вектором s_t. Динамика mRSU задается уравнениями состояния:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t + \frac{a(t)\Delta t^2}{2}$$
$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t.$$

При этом, управляющее воздействие $a(t) \in [a_{min}, a_{max}]$.

Таким образом, задача сводится к нахождению оптимальной стратегии, которая максимизирует накопленное вознаграждение, выраженное через минимизацию задержек обработки данных.

Моделирование и условия эксперимента

Для оценки эффективности предложенного подхода моделирование проводилось в программно-аппаратном комплексе simV2X [4]. Данная среда позволяет имитировать физический и канальный уровни (PHY/MAC) в соответствии со стандартами IEEE 802.11bd [5] и очередью обработки задач. Система построена на основании трехуровневой структуры V2X [6] с учетом уравнения баланса [7]. Задержка подразумевает собой не только задержку передачи в радиоканале, но и динамическое время ожидания в буфере mRSU, которое зависит от текущей интенсивности поступающего трафика и вычислительной мощности узла.

Моделируется двухполосный участок прямолинейной дороги, протяженностью в 1500 метров. 60 автомобилей (OBU), движущихся со средней скоростью 20 м/с, распределенных по длине всего участка дороги. 3 стационарных RSU и 1 mRSU. Интенсивность генерации задач варьируется во времени по синусоидальному закону, имитируя «волны» трафика.

Для обучения применялась библиотека «OpenAI Gymnasium». Она позволяет обеспечить стандартизированное взаимодействие между агентом и средой simV2X. Агент реализован на основе архитектуры Actor-Critic. Обе сети (актор/актер и критик) имеют полносвязную структуру (MLP):

1. Входной слой на 5 нейронов: нормализованные координаты, скорость, плотность задач и время.

2. Два скрытых слоя по 64 нейрона с нелинейной функцией активации (ReLU), которая обнуляет отрицательные входные значения и оставляет положительные без изменений, что обеспечивает вычислительную эффективность и ускоряет обучение и смягчает проблему затухающих градиентов.

3. Выходной слой: 1 нейрон с активацией гиперболического тангенса (tanh), определяющий значение ускорения в диапазоне [-1, 1], которое затем масштабируется до физических величин.

4. Выходной слой (критик): 1 нейрон, оценивающий ценность текущего состояния.

Целевая функция вознаграждения (Reward Function) была сформулирована как композиция средней задержки и штрафа за превышение допустимого времени обработки (deadline miss), что заставляет агента минимизировать распределение задержек. Обучение проводилось на протяжении $3 \cdot 10^5$ шагов симуляции. В рамках моделирования, запрещено останавливаться на трассе или выполнять разворот до достижения правой или левой границы трассы.

Результаты моделирования

Результаты проведенного численного моделирования подтверждают, что управление на основе обучения с подкреплением показывает лучшие результаты в отличие от реактивной стратегии. Количественная оценка эффективности алгоритмов проводилась по двум ключевым метрикам: средней задержке обработки задач и доле просроченных задач (miss ratio).

Эффективность предложенного DRL-агента оценивалась в сравнении с двумя базовыми стратегиями: стратегия выбор узла с минимальной мгновенной задержкой (MIN); реактивная нейронная сеть, обученная на локальных для OBU признаках стратегии MIN.

MIN служит референсом системы без активного управления mRSU: mRSU совершает пассивное движение. NN, в свою очередь, mRSU реагирует на текущие изменения среды без учета будущих состояний и предиктивного позиционирования, однако основывается только на локально доступных данных, в отличии от MIN, основывающегося на состоянии всей системы в целом. Хотя сами алгоритмы MIN и NN являются именно методами принятия решения о разгрузке вычислительных задач OBU и выходят за рамки основного исследования, они необходимы для создания конкурентной среды и оценки вклада проактивного управления ускорением. При обучении RL-агента, используется стратегия MIN.

На рисунке 1 представлены результаты сравнения средней задержки выполнения/обработки задач. Средняя задержка для RL-агента составила приблизительно 0.26 с, что более чем в два раза ниже показателей референсных стратегий MIN (0.52 с) и NN (0.55 с). Столь значительное преимуще-

ство напрямую связано с тем, что RL-агент заблаговременно корректирует скорость mRSU, обеспечивая оптимальное покрытие в моменты пиковой нагрузки.

Аналогичная тенденция наблюдается при анализе вероятности нарушения временных ограничений (рисунок 2). В то время как референсные алгоритмы демонстрируют долю просроченных задач на уровне 14-15 %, предложенный метод снижает этот показатель практически до нулевых значений. Столь значительный разрыв объясняется способностью RL-агента заблаговременно изменять положение mRSU, минимизируя влияние очередей и зон замирания, в которых реактивные методы оказываются бессильны из-за отсутствия предиктивной составляющей.

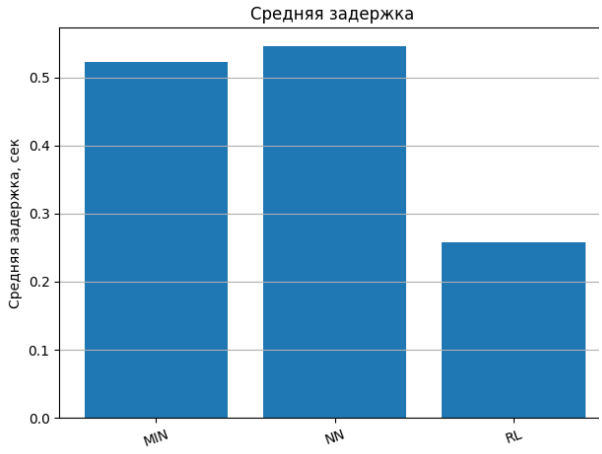


Рис. 1. Средняя задержка выполнения задачи

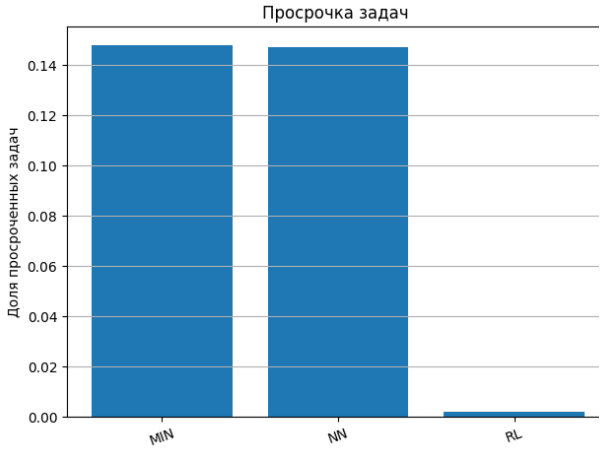


Рис. 2. Вероятность нарушения временных ограничений

Выводы

В представленной работе предложен и исследован метод проактивного управления мобильностью граничных вычислительных узлов (mRSU) в сетях V2X на основе глубокого обучения с подкреплением. В отличие от существующих реактивных подходов, ориентированных на мгновенные показатели качества канала, разработанный DRL-агент оптимизирует динамику движения mRSU (ускорение и скорость), опираясь на прогнозируемую пространственно-временную плотность запросов и состояние сети. Проведенное моделирование в среде simV2X подтвердило эффективность предиктивного позиционирования. Результаты показывают, что предложенный подход позволяет успешно реализовать задачи оперативного и тактического уровней управления (соответствующих парадигмам автономного локаль-

ного управления и непрерывного контроля динамики). Переход от управления логикой разгрузки задач к проактивному контролю физической мобильности инфраструктуры является перспективным направлением для обеспечения сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC) в интеллектуальных транспортных системах. Вместе с тем, в рамках данной работы акцент был сделан на управлении единичным мобильным узлом на ограниченном участке трассы. За рамками текущего исследования остается задача стратегического управления (выбор глобального маршрута в масштабах дорожной сети). Обеспечение сплошного покрытия крупных городских кластеров или протяженных участков магистралей силами одного mRSU является ресурсозатратным и малоэффективным решением. В связи с этим, дальнейшие исследования будут направлены на масштабирование предложенного подхода через внедрение мультиагентного обучения с подкреплением (MARL). Это позволит перейти к координации целого множества mRSU, где стратегическое планирование маршрутов будет сочетаться с предиктивным управлением ускорением каждого отдельного узла, обеспечивая адаптивное и бесшовное покрытие сложных графов дорожной сети.

Список используемых источников

1. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladyko A. G. Performance evaluation of V2X model with a mobile road side units //2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), 2023. PP. 1-4.

2. Singh M., Baranwal G. Quality of service (qos) in internet of things // 2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), 2018. PP. 1-6.

3. Sewak M. Deep reinforcement learning // Singapore: Springer Singapore, 2019, p.203.

4. Тамбовцев Г. И., Плотников П. В., Владыко А. Г. Программный модуль системы имитационного моделирования V2X среды (simV2X). Свид. о регистрации ПрЭВМ RU 2025689008. 23.10.2025.

5. IEEE 802.11bd: Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.11bd/7451/ (дата обращения: 24.02.2025).

6. Vladyko A., Plotnikov P., Tambovtsev G. Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure // Network, 2025. Vol. 5. N 1. PP. 4.

7. Плотников П. В., Тамбовцев Г. И., Владыко А. Г. Математическая модель многокритериальной балансировки параметров V2X-систем // Информатика и автоматизация, 2026. Т. 25. №. 1. С. 16-48.

PREDICTIVE CONTROL OF V2X MOBILE COMPUTING INFRASTRUCTURE BASED ON REINFORCEMENT LEARNING

Vladyko A., Plotnikov P., Tambovtsev G.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers a method of proactive control of mobile computing infrastructure (mRSU) in V2X networks based on deep reinforcement learning. The main focus is on predictive control of the node's acceleration and speed to compensate for signal loss zones and dynamic peaks in computational load. It is shown that the use of a machine learning algorithm can reduce the average data processing delay by more than two times and almost completely eliminate violations of time constraints compared to reactive strategies. The results confirm the advantage of predictive positioning of computing resources in a dynamic traffic flow.

Key words: V2X, mRSU, reinforcement learning, proactive control, predictive positioning, intelligent transport systems

УДК 550.385.4
ГРНТИ 10.19.61

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗА 2024 – 2025 РАДИОГОДЫ

В. А. Волостных, П. В. Воробьев, Д. Ф. Ткачев

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье представлены результаты анализа динамики изменений основных характеристик геомагнитных возмущений природного характера, влияющих на функционирование магистральных коротковолновых радиолиний за 2024/25 и 2025/26 радиогоды. Анализ проведен по сезонам каждого радиогода. Результаты анализа могут быть использованы при проектировании систем магистральной радиосвязи, разработке радиоданных для обеспечения магистральной коротковолновой радиосвязи, а также могут быть использованы при продолжении дальнейших исследований аномалий распространения радиоволн.

анализ ионосферных возмущений, геомагнитные возмущения, ионосфера, магистральная коротковолновая радиосвязь, магнитная буря, радиогод, радиоданные

В последние десятилетия произошли существенные изменения в сфере телекоммуникаций: получили развитие системы сотовой радиосвязи, спутниковой связи, связи, основанной на применении оптоволоконных линий. Но несмотря на бурное развитие новых технологий передачи информации, не теряет актуальность коротковолновая (КВ) радиосвязь, осуществляемая на основе отражений от верхних слоев ионосферы. При этом могут быть образованы одно и двухскачковые радиотрассы. На основе этого механизма функционируют магистральные линии коротковолновой радиосвязи, которые обеспечивают доведение информационных сообщений на значительные расстояния без применения промежуточных средств обработки информации.

Исследованию распространения радиоволн коротковолнового диапазона посвящен широкий ряд научных трудов [1–4]. Однако, несмотря на установленные закономерности механизма распространения радиоволн, некоторые аспекты этого механизма требуют дополнительного изучения, что вызвано необычными явлениями, связанными с солнечной активностью [1]. Из средств массовой информации известно, что в 2024 и в 2025 годах наблюдалась высокая солнечная активность, которая проявлялась в виде

магнитных бурь – геомагнитных возмущений (ГМВ) различной интенсивности и продолжительности. Отмечалось влияние магнитных бурь (МБ) на работоспособность радиоэлектронных средств, систем радиосвязи.

Вопросам исследования влияния геомагнитных возмущений на распространение коротких волн посвящен ряд трудов [5–9].

В целях оценки возможного воздействия ГМВ на магистральную коротковолновую радиосвязь проводился анализ характеристик геомагнитных возмущений. Анализ проводился по прогнозам МБ, публикуемых на каждый месяц года [10]. Данные об уровне МБ по 10 бальной шкале приводятся на каждые сутки в дискретном виде на каждый трехчасовой интервал.

В ходе анализа динамики изменений ГМВ, оценка проводилась по сезонам радиогода и за каждый радиогод в целом.

В качестве показателей, характеризующих ГМВ предложено следующее:

$N^{jc}_{(y \geq y_{зад})}$ – количество ГМВ в j-ом сезоне радиогода, уровня не ниже заданного, *ед*;

$\bar{t}^{\,jc}_{(y \geq y_{зад})}$ – среднее значение продолжительности ГМВ в j-ом сезоне радиогода, уровня не ниже заданного, в *часах*.

В соответствии с установленным подходом, анализ характеристик ГМВ проведен:

– для 1 сезона радиогода за период с 1 марта по 6 мая;
– для 2 сезона радиогода за период с 7 мая по 31 августа;
– для 3 сезона радиогода за период с 1 сентября по 31 октября;
– для 4 сезона радиогода за период с 1 ноября по 28 февраля;
– для 2024/25 радиогода в целом за период с 1 марта 2024 г. по 28 февраля 2025 г., а для 2025/26 радиогода за период с 1 марта 2025 г. по 28 февраля 2026 г.

Поскольку на обеспечение коротковолновой магистральной радиосвязи ГМВ оказывают заметное влияние, начиная с уровня 5 ($y \geq y_5$), то анализ проведен для ГМВ начиная с 5 уровня.

На основе ежемесячных прогнозов по приведенным показателям проведены расчеты и оценки данных об уровне ГМВ, которые представлены в таблице 1 и в таблице 2.

ТАБЛИЦА 1. Количество геомагнитных возмущений в 2024-2025 радиогодах и в 2025-2026 радиогодах

Уровень ГМВ	Радиогод	Количество геомагнитных возмущений, ед				
		1 сезон	2 сезон	3 сезон	4 сезон	За радиогод
У ≥ 5	2024/25	9	21	13	8	51
	2025/26	16	22	14	18	70
У ≥ 6	2024/25	1	7	6	-	14
	2025/26	4	3	1	6	14
У ≥ 7	2024/25	-	3	3	-	6
	2025/26	1	2	-	3	6
У ≥ 8	2024/25	-	2	3	-	5
	2025/26	-	-	-	3	3

Примечание: уровень 5 – умеренная геомагнитная буря; уровень 6 – сильная геомагнитная буря; уровень 7 – жесткий геомагнитный шторм; уровень 8 – экстремальный шторм.

ТАБЛИЦА 2. Средняя продолжительность геомагнитных возмущений в 2024 – 2025 и 2025 – 2026 радиогодах

Уровень ГМВ	Радиогод	Средняя продолжительность геомагнитных возмущений, час				
		1 сезон	2 сезон	3 сезон	4 сезон	За радиогод
У ≥ 5	2024/25	6	8,14	12	16,9	10,8
	2025/26	6,7	4,7	4	14	7,3
У ≥ 6	2024/25	9	9,9	13	-	10,6
	2025/26	5,3	7,2	3	13,5	7,2
У ≥ 7	2024/25	-	12	11		11,5
	2025/26	3	10,5	-	10	10,2
У ≥ 8	2024/25	-	7,5	4		5,7
	2025/26	-	-	-	4,5	4,5

Анализ данных о геомагнитных возмущениях показал, что в годы максимальной солнечной активности (рис. 1) число возмущений уровня не ниже 5 ($У \geq У_5$) может быть равно 50-70 при средней продолжительности, равной 7-10 часов; из них число возмущений уровня не ниже 6 ($У \geq У_6$) может быть равно 14 при средней продолжительности 7-10 часов, из них число

возмущений уровня не ниже 7 ($У \geq У_7$) может быть равно 6 при средней продолжительности 10-11 часов, из них число возмущений уровня не ниже 8 ($У \geq У_8$) может быть равно 5 при средней продолжительности 5-7 часов.



Рис. 1. Циклы солнечной активности

Следует отметить, что данные о средней продолжительности ГМВ можно использовать только для статистических оценок, что вызвано существенным разбросом длительности возмущений. Так, 1 июня 2025 года продолжительность ГМВ с уровнем 7 составили 18 часов, что наверняка оказало существенное влияние на обеспечение радиосвязи ионосферными волнами в данном (Северо-Западном) регионе. А в ряде других случаев длительность ГМВ составляла 3 – 6 часов.

Геомагнитное возмущение 9 уровня произошло в мае месяце 2024 года. Это явление продолжалось в течение 3-х часов и оказало существенное влияние на распространение радиоволн в КВ диапазоне.

Важно учитывать, что существенное влияние ГМВ на ионосферу возникает на вторые сутки после возникновения солнечной активности.

Полученные характеристики ГМВ могут быть использованы при проектировании новых систем магистральной КВ радиосвязи и при разработке радиоданных для существующих систем радиосвязи, а также разработке мероприятий по обеспечению радиосвязи в условиях экстремальных ГМВ, что особенно важно для двухскачковых радиотрасс.

Выводы и предложения

Анализ динамики изменения характеристик ГМВ за последние 2 года показал следующее

1. Поскольку оба рассматриваемых годовых периода находятся в пике солнечной активности, то характеристики ГМВ отличаются несущественно, но составляют значительное число как по количеству «пиков ГМВ», так и по их продолжительности, то целесообразно проектируя создание систем связи исходить из того, что ГМВ оказывают и будут оказывать существенное влияние на обеспечение магистральной радиосвязи.

2. Известно, что радиоданные для магистральной КВ радиосвязи разрабатываются на каждый сезон радиогода, с учетом дневных и ночных, а иногда и промежуточных радиочастот, следует учитывать статистические данные и прогнозы ГМВ для данного региона.

3. Очевидно, что наибольший выигрыш по устойчивости радиосвязи в сложных условиях могут обеспечить средства (системы) адаптивной радиосвязи. Но и для средств адаптивной радиосвязи могут потребоваться данные об аномальном распространении радиоволн.

4. Несмотря на значительное количество материалов, посвященных исследованию влияния магнитных бурь на распространение радиоволн КВ диапазона, в связи с малой предсказуемостью солнечной активности, можно считать целесообразным продолжение исследований по данной тематике.

5. Представляется целесообразным проведение исследований характеристик ГМВ, влияющих на обеспечение магистральной КВ радиосвязи для арктической зоны.

Список используемых источников

1. Мейнке Х. и Гундлах Ф. В. Радиотехнический справочник. Том 1. Радиодетали. Цепи с сосредоточенными параметрами. Линии передачи. Волноводы. Резонаторы. Антенны. Распространение радиоволн. Перевод с немецкого. Государственное энергетическое издательство. Москва 1960, 416с.

2. Серков В. П. Распространение радиоволн и антенные устройства., Л., ВАС, 1981, 468, ил.

3. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. Том 1.: Пер. с нем. Мн: ОМО «Наш город», 2001. 416 с.: ил.

4. Харченко И. П. 13 лекций по регулированию и мониторингу использования радиочастотного ресурса / И. П. Харченко. СПб. Линк, 2008, 210 с.

5. Котова Д. С., Клименко В. В., Клименко М. В., Захаров В. Е. Численное моделирование влияния геомагнитной бури 2 – 3 мая 2010 года на распространение коротких радиоволн в ионосфере. / Известия вузов. Радиофизика. 2014. № 7. 520-530 стр.

6. Благовещенский Д. В., Сергеева М. А., Воздействие магнитных бурь на нижнюю ионосферу в авроральной зоне. / Солнечно-земная физика. 2015. Том 1. № 3. 3-10 стр.

7. Куркин В. И., Полех Е. М., Золотухина Н. А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн. / Геомагнитизм и аэронамия, 2022, том 62. № 2. С. 245-256.

8. Волостных В. А., Стародубцев Ю. И., Ткачев Д. Ф. Влияние магнитных бурь на распространение радиоволн коротковолнового диапазона. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С 36-42.

9. Волостных В. А., Воробьев П. В., Ткачев Д. Ф. Мониторинг декаметрового диапазона радиоволн В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С. 104-108.

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF GEOMAGNETIC DISRUPTIONS CHANGES FOR 2024 – 2025 RADIO YEARS

Volostnyh V., Vorobyev P. Tkachev D.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

The article presents the results of the analysis of the dynamics of changes in the main characteristics of geomagnetic disturbances of a natural nature that affect the functioning of trunk short-wave radio lines in the 2024/25 and 2025/26 radio years. The analysis was conducted by season for each radio year. The results of the analysis can be used in the design of trunk radio communication systems, the development of radio data for trunk short-wave radio communication, and can also be used in further research on radio wave propagation anomalies.

Key words: analysis of ionospheric disturbances, geomagnetic disturbances, ionosphere, long-range short-wave radio communication, magnetic storm, radio year, radio data

УДК 004.932.2
ГРНТИ 28.23.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПОРТРЕТОВ ДЛЯ ГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

П. А. Волынкин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Задачи идентификации текстовых объектов могут решаться частотными методами – созданием частотных портретов объектов и авторов. Для графических объектов задача идентификации также становится все более актуальной с развитием цифровых технологий обработки изображений. В работе представлена постановка задачи, рассмотрены основные факторы графических объектов, которые могут быть индивидуальными характеристиками того или иного автора графического объекта. Кроме этого, намечены группы методов, которые могут учитывать значимые факторы графических объектов.

компьютерное зрение, идентификация авторства, частотные портреты, анализ изображений

Для совершения качественных скачков в области анализа и визуализации данных требуется в рамках активного развития цифровых технологий как стремительный рост вычислительных мощностей, так и совершенствование методов компьютерного зрения. На данном этапе развития цифровых технологий это становится не только возможным, но и необходимым.

В задачах анализа визуальных данных одной из наиболее сложных, но с другой стороны и практически актуальных задач, становится задача идентификация не просто самих изображения изображений, но и определения их авторства. Это особенно важно в случаях, когда визуальное изображение создано конкретным человеком с его индивидуальным творческим почерком.

В ходе оцифровки музейных фондов резко возрастает объем графических данных, которые требуют обработки: систематизации, классификации, атрибуции, в междисциплинарных исследованиях, в судебной экспертизе, в борьбе с фальсификациями.

Ранее такого рода задачи решались «вручную», то есть экспертами на основе личного профессионального опыта и визуальной интуиции. Но

в подобных случаях при восприятии визуальных образов неизбежны были ошибки субъективного характера, а сам анализ и оценка становились трудоемкими и трудновоспроизводимыми. Человек уже не справляется с подобными задачами: не хватает экспертов, их обучение длительно и затратно.

Ввиду этого очевидна необходимость в разработке моделей, а затем и программных продуктов, для решения подобных задач средствами компьютерного зрения и инструментов машинного обучения.

По аналогии при работе с текстовыми объектами, когда были введены понятия «Частотных портретов» конкретных авторов [1-4], предлагается и при работе с авторскими работами в изобразительной области также ввести понятие «Частотного портрета» автора (ЧПА) изобразительного графического объекта (ГО). Подобный частотный портрет автора на основе предлагаемой модели должен формироваться с использованием статистических методов и средств компьютерного зрения на базе предварительно оцифрованной многочисленной базе данных изобразительных произведений, принадлежащих данному автору. Когда для довольно большого числа известных авторов будут созданы такие частотные портреты и появится отдельный экземпляр неизвестного авторства, то при допущении, что его произведения этого автора уже включены в один из многочисленных частотных портретов, появляется возможность определить авторство этого конкретного визуального объекта.

Так как подобные задачи имеют дело с широким спектром графических данных (от картин, рисунков до фотографий и графических макетов), произведения искусства оказываются, в первом приближении, удобным материалом при разработке модели ЧПА ГО. Картины, рисунки и иные художественные изображения могут иметь массу уникальных параметров:

– особенности мазков;
– характер контуров;
– текстуру;
– повторяющиеся структуру цветовых сочетаний.

Разработка обсуждаемой модели частотного графического объекта не ограничивается только объектами искусствоведческого анализа, а является лишь примером работы со сложными данными.

При создании модели частотного портрета графического объекта (МЧП ГО) визуальные данные рассматриваются как неявные сложные системы. То есть:

– изображение состоит из набора взаимодействующих элементов;

– закономерности этих взаимосвязей неявны и однозначным набором правил не могут быть описаны;
– авторский почерк неявен и доступен к выявлению только средствами матанализа;
– взаимосвязи между элементами изображения носят нелинейный характер.

С позиции теории сложных систем, автор изображения представляет собой это источник особого «динамического процесса» (например, написание картины), результатом чего становится графический объект. Этот динамический процесс не смоделировать непосредственно, но он оставляет после себя своего рода «следы» в структуре данных:
– распределение частот;
– спектральную плотность;
– локальные текстуры;
– цветовые паттерны;
– статистические особенности размещения элементов.

Разрабатываемая модель состоит из четырех относительно автономных блоков:

1. Блок частотного портрета конкретного графического объекта.
2. Блок формирования частотного портрета автора.
3. Блок формирования базы данных частотных портретов авторов.
4. Блок определения авторства для конкретного графического объекта.

Очевидно, что каждый из четырех блоков базируется на модели более низкого уровня – модели частотного портрета графического объекта.

В связи с этим, первостепенной задачей становится задача исследования и выделения значимых факторов графического объекта, которые могут стать элементами модели частотного портрета.

К таким факторам можно отнести: распределение частот расположения пикселей на двумерном холсте, спектральную плотность, степень размытости изображения, цветовые паттерны и т.д.

Задачей второго порядка становится задача поиска, апробации и взаимосвязывания методов цифрового анализа графического объекта по отношению к выявленным ранее значимым факторам.

К таким методам можно отнести:
– глобальное преобразование Фурье – используется для всего объекта в целом. Позволяет перейти от пространственного представления изображе-

ния к частотному, где отражается вклад различных пространственных частот в формирование визуального образа;

– оконное преобразование Фурье – применяется для отдельных фрагментов объекта для учета нестационарности изображения. Однако, спектр Фурье показывает, какие частоты присутствуют в изображении, но не указывает, в каких областях изображения они проявляются;
– Вейвлет-преобразование. Учитывается расположение частотных компонент в пространстве. Изображение раскладывается на набор аппроксимирующих и детализирующих компонент. Аппроксимация отражает низкочастотное содержание изображения, тогда как детали характеризуют изменения на более мелких масштабах. Математически Вейвлет-преобразование представляет собой каскад фильтров нижних и верхних частот с последующим прореживанием сигнала. Итак, вейвлет-преобразование позволяет одновременно учитывать как частотные, так и пространственные характеристики;
– метод доминирующих цветов. Тут применяется кластеризация цветового пространства графического объекта. Затем проводится анализ полученных кластеров. Каждый найденный кластер представляет набор близких по цвету пикселей. Кроме этого, учитывается еще и доля кластера в общем графическом объекте. Это позволяет учесть распространенность данного цвета в графическом объекте;
– оценка степени размытости изображения. Эта степень также может представлять авторский стиль. Для оценки размытости целесообразно использовать методы, основанные на анализе градиентов и ВЧ компонент изображения, учитывая дисперсию отклика оператора Лапласа, которая отражает насыщенность изображения высокочастотными компонентами. Кроме этого, можно учитывать среднюю величину градиента, характеризующую интенсивность изменений яркости (метод Собеля), а также плотность контуров на основе метода детектора границ Кэнни.

В итоге, все вышеперечисленные факторы (частотные профили, цветовые характеристики, вейвлет-коэффициенты и показатели размытости) при помощи также перечисленных методов объединяются в единый комплексный вектор. Фактически именно он и будет являться частотным портретом конкретного графического объекта.

Данная статья является отражением начального этапа работы над проблемой формирования частотных портретов графических объектов.

Список используемых источников

1. Волынкин П. А. Частотные портреты в идентификации авторства // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. XX-IV Междунар. науч. конф. (СПб., 31 мая – 4 июня 2021 г.): сб. статей: в 3 ч. СПб.: ГУАП, 2021. Ч. 3. С. 46-51.
2. Волынкин П. А., Гянджиев Э. Э. Частотные портреты и методы их формирования // Наука и образование, сб. статей XV Межд.научно-практической конференции, Наука и просвещение, 2018. С. 49-55.
3. Волынкин П. А., Гянджиев Э. Э. Идентификация авторства текста при помощи частотных портретов // Наука и образование: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 150-155.
4. Волынкин П. А., Гянджиев Э. Э. Исследование методов формирования частотных портретов. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, VII Межд.научно-техническая и научно-методическая конференция, СПб ГУТ, 2018. С. 195-202.

MODELING OF FREQUENCY PORTRAITS FOR GRAPHICAL OBJECTS

Volynkin P.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

Tasks of identification of text objects can be solved by frequency methods – the creation of frequency portraits of objects and authors. For graphical objects, the task of identification also becomes more and more relevant with the development of digital technologies for image processing. The paper presents the formulation of the problem, the main factors of graphical objects are considered, which can be individual characteristics of this or that author of a graphical object. In addition, there are groups of methods that can take into account significant factors of graphical objects.

Key words: computer vision, author identification, frequency portraits, image analysis

УДК 621.391.15
ГРНТИ 49.03.05

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛЯРНЫХ КОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ КОНФИГУРАЦИИ

Т. З. Ву, Е. И. Глушанков, К. К. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Полярные коды играют ключевую роль в современных системах связи благодаря своей способности достигать пропускной способности канала. В данной работе посредством моделирования в среде MATLAB проводится оценка влияния длины кода и конфигурационных параметров декодирования на помехоустойчивость системы. Полученные результаты демонстрируют корреляцию между исследуемыми параметрами, что позволяет определить оптимальную рабочую точку для обеспечения баланса между надежностью и вычислительной сложностью в практических приложениях.

полярные коды, алгоритм декодирования, вероятность блоковой ошибки, MATLAB.

Полярные коды

Полярные коды [1], предложенные Ариканом в 2009 году, представляют собой первый класс кодов исправления ошибок, для которых теоретически доказана способность достигать пропускной способности канала для любых двоичных дискретных каналов без памяти. В основе теории полярных кодов лежит явление поляризации канала. Этот процесс заключается в объединении N независимых копий физического канала W для создания векторного канала W_N с последующим его расщеплением на N виртуальных битовых каналов, обозначаемых $W_N^{(i)} (1 \leq i \leq N)$.

Теорема поляризации утверждает, что доля каналов, становящихся идеальными, стремится к пропускной способности Шеннона $I(W)$ исходного канала, тогда как доля зашумленных каналов стремится к $1 - I(W)$. Схема кодирования эффективно использует это свойство, передавая информационные биты по надежным каналам и фиксируя значения на зашумленных каналах заранее известными значениями (обычно нулями), называемыми «замороженными битами».

Математически процесс кодирования реализуется посредством линейного преобразования:

$$x_1^N = u_1^N G_N,$$

где u_1^N – входной вектор, а G_N – порождающая матрица размером $N \times N$. Матрица G_N определяется рекурсивно через произведение Кронекера для ядерной матрицы $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ по формуле $G_N = B_N F^{\otimes}$ (где $n = \log_2 N$, а B_N – матрица битовой инверсии). Данная рекурсивная структура позволяет строить полярные коды из базовых блоков 2×2 и является ключом к обеспечению низкой вычислительной сложности процессов кодирования и декодирования порядка $O(NlogN)$ [1].

Для наглядного представления механизма поляризации в качестве базовой модели выбран двоичный канал со стиранием (BEC). Данная модель позволяет выполнить точный алгебраический расчет параметров канала, избегая аппроксимации плотности, характерной для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) [2]. Для канала BEC(ϵ) с вероятностью стирания ϵ параметр Бхаттачарьи определяется как $Z(W) = \epsilon$, а пропускная способность составляет $I(W) = 1 - \epsilon$.

Процесс поляризации начинается с объединения двух независимых копий канала W. Согласно правилам рекурсивного преобразования, параметры Бхаттачарьи для «худшего» (W^-) и «лучшего» (W^+) каналов вычисляются следующим образом:

$$Z(W^-) = 2\epsilon - \epsilon^2 \geq \epsilon,$$
$$Z(W^+) = \epsilon^2 \leq \epsilon.$$

Приведенные неравенства показывают, что на каждом этапе преобразования разрыв в надежности между каналами увеличивается. При многократном повторении этого процесса с увеличением длины кода N, кумулятивный эффект заставляет значения $Z(W_N^{(i)})$ стремительно сходиться к двум экстремумам: 0 и 1. Для эмпирического подтверждения влияния длины кода на скорость этой сходимости рассмотрим представленный рис. 1. ниже распределения пропускной способности каналов.

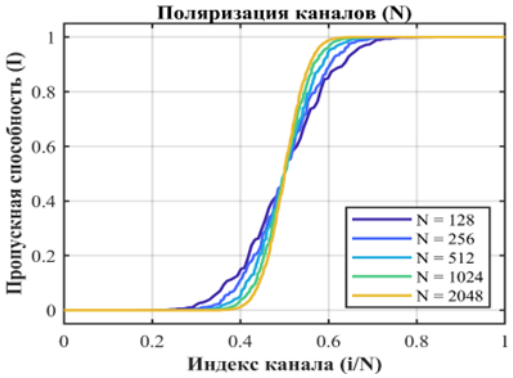


Рис. 1. Поляризация каналов в зависимости от длины кода N

Насыщение поляризации при больших N указывает на четкое формирование множества высоконадежных каналов. Это служит теоретической основой для прогнозирования улучшения эффективности декодирования, что будет детально верифицировано экспериментально в следующем разделе.

Несмотря на теоретический потенциал полярных кодов в достижении пропускной способности канала, их реальная эффективность при конечной длине блока критически зависит от применяемой стратегии декодирования. Базовый алгоритм последовательного исключения [1] (от англ. Successive Cancellation – SC), обладая низкой вычислительной сложностью, демонстрирует существенный недостаток в виде эффекта распространения ошибок из-за своей природы последовательного принятия жестких решений; единичная ошибка может исказить весь последующий процесс декодирования. Для преодоления этого ограничения был предложен метод списочного декодирования [3] (от англ. Successive Cancellation List – SCL), который поддерживает параллельный список из L наиболее вероятных путей вместо одного, тем самым расширяя пространство поиска. Однако максимальная эффективность достигается лишь в сочетании с циклическим избыточным кодом (от англ. Cyclic Redundancy Check – CRC) в конфигурации CA-SCL [4] (от англ. CRC-Aided Successive Cancellation List – CA-SCL), где CRC служит финальным критерием для идентификации верного пути из списка L кандидатов.

Тем не менее, реальная корректирующая способность алгоритма CA-SCL находится в прямой зависимости от конфигурационных параметров системы, а именно: длины кода N, размера списка L и длины CRC. В связи с этим, исследование влияния данной комбинации параметров является необходимым шагом для оптимизации декодера, что будет наглядно продемонстрировано на результатах моделирования, представленных далее.

Результаты моделирования

Количественная оценка производительности системы проводилась в среде моделирования канала с АБГШ с использованием модуляции BPSK (от англ. Binary Phase Shift Keying – BPSK) и фиксированной скоростью кодирования $R = 1/2$. Для максимизации энергетического выигрыша применялся алгоритм декодирования CA-SCL, использующий циклический избыточный код. В первой конфигурации исследования анализировалось влия-

ние длины кода N при фиксированных параметрах CRC (16 бит) и размере списка $L = 8$, где N варьировалось в диапазоне $N = \{128, 256, 512, 1024, 2048\}$. Представленные на рис. 2 кривые вероятности блоковой ошибки (от англ. Block Error Rate – BLER) демонстрируют прямую зависимость производительности системы от длины кода, при этом крутизна графиков существенно возрастает при больших значениях N. Полученные данные служат экспериментальным подтверждением теоретического эффекта концентрации емкости канала; при достаточно большом N глубокая поляризация формирует высоконадежное информационное множество, способствуя точной сходимости декодера. Примечательно, что интервал энергетического выигрыша между уровнями N имеет тенденцию к сокращению в области высоких отношений сигнал/шум, что подтверждает энергоэффективность полярных кодов даже при средних длинах блоков.

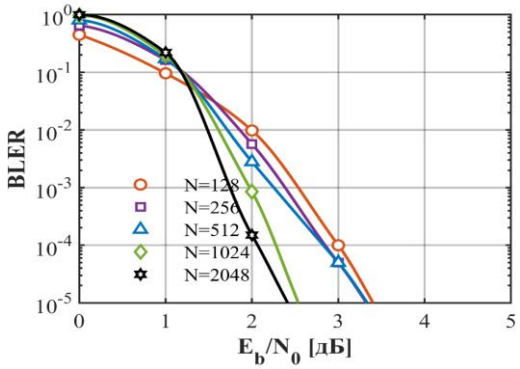


Рис. 2. Зависимость BLER от длины N

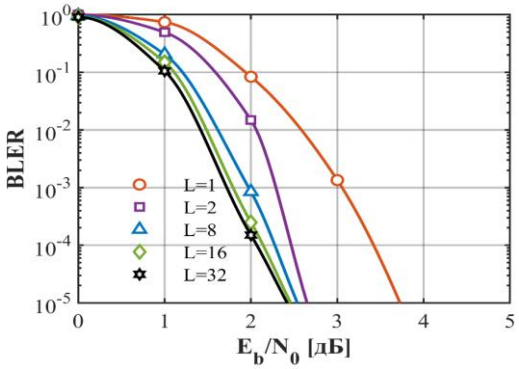
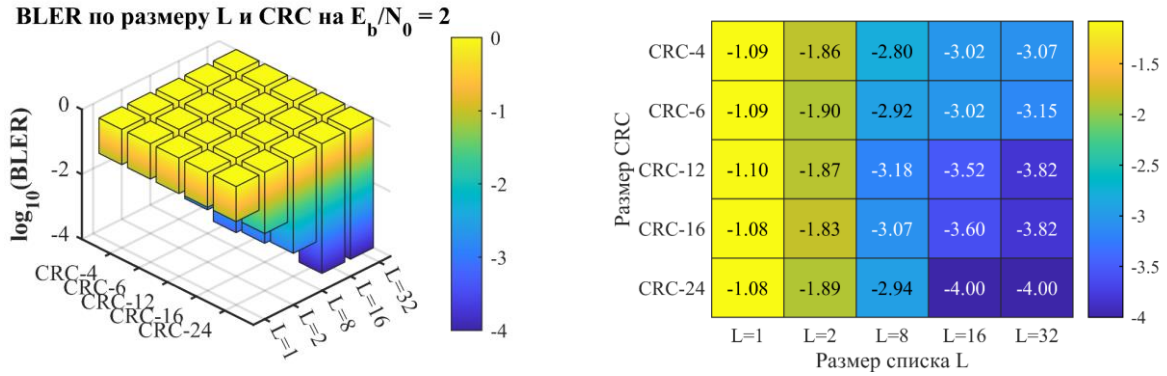


Рис. 3. Зависимость BLER от списка L

Далее в работе оценивался вклад размера списка декодирования путем фиксации длины кода $N = 1024$ и варьирования L в множестве $\{1, 2, 8, 16, 32\}$. Анализ рис. 3 выявляет нелинейный характер улучшения помехоустойчивости. Переход от алгоритма SC $L = 1$ к SCL ($L = 2$ или 8) обеспечивает наибольший скачок энергетического выигрыша, поскольку многопутевой механизм эффективно устраняет эффект распространения ошибок, присущий однопутевым алгоритмам. Однако при дальнейшем увеличении списка с 8 до 32 наблюдается эффект насыщения, и разница в производительности между $L = 16$ и $L = 32$ становится пренебрежимо малой. Данный факт указывает на то, что для конфигурации $N = 1024$ ограничение производительности системы определяется уже не шириной поиска декодера, а пределом минимального кодового расстояния самого кода. Следовательно, выбор значений $L = 8$ или $L = 16$ представляет собой оптималь-

ную рабочую точку, обеспечивающую наилучший баланс между надежностью и вычислительной сложностью в практических приложениях.

С целью оптимизации конфигурации декодера было исследовано совместное влияние длины CRC и размера списка $L = 8$ для полярного кода с $N = 1024$ при $E_b/N_0 = 2$ дБ. Результаты моделирования на рис. 3.а, б демонстрируют тесную взаимосвязь этих параметров. В области малых списков $L \leq 2$ производительность системы насыщается и оказывается нечувствительной к длине CRC.



а) б)

Рис. 3. Зависимость BLER от совокупного влияния размера списка L и длины CRC: а) 3D-визуализация; б) Тепловая карта значений $\log_{10}(BLER)$

Напротив, при расширении пространства поиска до $L \geq 8$, длина CRC становится определяющим фактором. Комбинация большого списка $L = 32$ и мощного CRC (CRC-24) позволяет снизить вероятность ошибки до уровня $\log_{10}(BLER) \approx -4.00$, что существенно превосходит показатели CRC-4 (достигающего лишь -3.07). Полученные данные подтверждают, что для полной реализации потенциала алгоритма SCL с большим L, использование достаточно длинного CRC является необходимым условием для точной селекции финального пути.

Заключение

В исследовании определено влияние параметров алгоритма декодирования CA-SCL на эффективность полярных кодов. Результаты доказывают, что увеличение длины кода N является условием для получения высокого поляризационного выигрыша. Для декодера размер списка $L = 8$ определен как точка эффективного насыщения, устраняющая распространение ошибок без избыточных вычислений. При этом длина CRC играет решающую роль в точности селекции пути. На основе полученных данных, конфигурация

$N = 1024, L = 8, \mathrm{CRC} - 16$ предложена как оптимальное решение, балансирующее надежность и сложность системы.

Список используемых источников

1. Arikan E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on information Theory. 2009.Vol. 55. Iss. 7, PP. 3051-3073. DOI: 10.1109/TIT.2009.2021379.

2. Trifonov P. Efficient design and decoding of polar codes // IEEE transactions on communications. 2012. Vol. 60, Iss. 11, PP. 3221-3227. DOI: 10.1109/TCOMM.2012.081512.110872.

3. Tal I., Vardy A. List decoding of polar codes // IEEE transactions on information theory. 2015. Vol. 61, Iss.5, PP. 2213-2226. DOI: 10.1109/TIT.2015.2410251.

4. Niu K., Chen K. CRC-aided decoding of polar codes // IEEE communications letters. 2012. Vol. 16, Iss. 10, PP. 1668-1671. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.090312.121501.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры радиотехники СПБГУТ, доктором технических наук, профессором Е. И. Глушанковым.

PERFORMANCE EVALUATION OF POLAR CODES DEPENDING ON CONFIGURATION PARAMETERS

Vu T., Glushankov E., Pham Q.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

Polar codes play a crucial role in modern communication systems due to their ability to achieve channel capacity. In this paper, the impact of code length and decoding configuration parameters on the system's error performance is evaluated via MATLAB simulations. The findings reveal a correlation among the investigated parameters, facilitating the identification of an optimal operating point that balances reliability and computational complexity for practical applications.

Key words: polar codes, decoding algorithm, block error probability, MATLAB

УДК 621.396; 004.8
ГРНТИ 49.43.29; 28.23.37

СНИЖЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ЛИНЕЙНОГО ПРЕДКОДИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ MU-MIMO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

З. Т. Ву, Е. И. Глушанков, К. К. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рост числа антенн в перспективных системах беспроводной связи приводит к критическому увеличению вычислительной сложности алгоритмов цифровой обработки сигналов, в частности, на этапе предварительного кодирования. Классический линейный алгоритм MMSE (Minimum Mean Square Error) требует операции обращения матрицы канала, сложность которой кубически зависит от размерности системы, что затрудняет реализацию в реальном времени. В данной работе предлагается эффективный итерационный метод аппроксимации обратной матрицы на основе алгоритма сопряженных градиентов с предобусловливанием. Ключевой новизной исследования является разработка интеллектуального механизма адаптации числа итераций с использованием глубокой нейронной сети. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный гибридный подход позволяет достичь помехоустойчивости, сопоставимой с методом прямой инверсии, при существенном снижении вычислительных затрат, особенно в условиях коррелированных каналов.

системы MU-MIMO, предварительное кодирование MMSE, вычислительная сложность, метод сопряженных градиентов, глубокое обучение.

Развитие технологий MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) в сетях 5G и 6G сталкивается с проблемой высокой вычислительной сложности алгоритмов формирования луча, особенно при реализации линейного прекодирования MMSE (Minimum Mean Square Error) [1]. Операция прямого обращения матрицы канала, имеющая кубическую сложность, становится узким местом для реализации в реальном времени при увеличении числа антенн. Существующие итерационные методы аппроксимации, такие как метод сопряженных градиентов (Conjugate Gradient, CG) [2], позволяют снизить сложность до квадратичной. Однако классический CG обладает существенным недостатком: использование фиксированного числа итераций является неэффективным, приводя к избыточным вычислениям в благоприятных условиях распространения радиоволн. В данной работе предлагается гибридный подход, объединяющий метод сопряженных градиентов с предобусловливанием (Preconditioned Conjugate Gradient, PCG) и модуль управле-

ния на основе глубокого обучения. Разработанная нейронная сеть анализирует состояние канала и адаптивно определяет минимально необходимое число итераций. Это позволяет динамически оптимизировать баланс между вычислительной эффективностью и помехоустойчивостью системы, устраняя недостатки традиционных алгоритмов с фиксированной структурой.

Системная модель. Рассматривается система беспроводной связи MU-MIMO нисходящего канала, состоящая из одной базовой станции, оснащенной N_T передающими антеннами, и N_U одноантенных абонентских терминалов, где $N_T \geq N_U$. Передача данных осуществляется с использованием технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Для k-й поднесущей вектор принятого сигнала $\boldsymbol{y}_k \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ для всех пользователей описывается уравнением:

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{n}_k,$$

где $\boldsymbol{x}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ – вектор переданного сигнала после предварительного кодирования, $\boldsymbol{H}_k \in \mathbb{C}^{N_U \times N_T}$ – матрица канала, $\boldsymbol{n}_k$ – вектор аддитивного белого гауссовского шума с дисперсией σ_n^2.

В данной работе моделируется канал с замираниями, учитывающий пространственную корреляцию на передающей стороне. Матрица канала формируется согласно модели Кронекера [3]:

$$\boldsymbol{H}_k = \boldsymbol{H}_{w,k} \boldsymbol{R}_T^{1/2},$$

где $\boldsymbol{H}_{w,k}$ – матрица, элементы которой являются независимыми и одинаково распределенными комплексными гауссовскими случайными величинами, моделирующими базовые замирания канала, $\boldsymbol{R}_T$ – матрица пространственной корреляции передающих антенн. Элементы матрицы $\boldsymbol{R}_T$ определяются на основе экспоненциальной модели корреляции:

$$[\boldsymbol{R}_T]_{i,j} = \rho^{|i-j|}, \quad 0 \leq \rho < 1,$$

где ρ – коэффициент корреляции между соседними антенными элементами. Высокое значение ρ приводит к увеличению числа обусловленности матрицы канала, что существенно усложняет задачу инверсии.

Для минимизации внутрисистемной интерференции и максимизации отношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) используется линейное предварительное кодирование. Вектор переданного сигнала формируется как $\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{W}_k \boldsymbol{s}_k$, где $\boldsymbol{s}_k \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ – вектор информационных символов, а $\boldsymbol{W}_k \in$

$\mathbb{C}^{N_T \times N_U}$ – матрица прекодирования. Матрица весовых коэффициентов согласно критерию MMSE определяется выражением [4]:

$$\boldsymbol{W}_{MMSE} = \boldsymbol{H}_k^H \left(\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{H}_k^H + \alpha \boldsymbol{I}_{N_U} \right)^{-1}, \quad (1)$$

Основной вычислительной сложностью в выражении (1) является операция обращения матрицы $\boldsymbol{A}_k = \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{H}_k^H + \alpha \boldsymbol{I}_{N_U}$ размерностью $N_U \times N_U$. Прямое вычисление обратной матрицы $\boldsymbol{A}_k^{-1}$ требует $O({N_U}^3)$ операций, что является препятствием для масштабирования системы. В следующем разделе рассматривается применение итерационного метода для эффективного решения данной задачи.

Предлагаемый гибридный алгоритм. Для преодоления ограничений прямой инверсии матриц предлагается двухэтапный подход: использование итерационного метода PCG для решения линейной системы и применение глубокой нейронной сети для адаптивного управления сложностью алгоритма. Задача вычисления вектора прекодирования $\boldsymbol{w} = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}$ эквивалентна решению системы линейных алгебраических уравнений вида $\boldsymbol{A}\boldsymbol{w} = \boldsymbol{h}$. Скорость сходимости PCG зависит от спектрального распределения собственных чисел матрицы $\boldsymbol{A}$. Для уменьшения числа обусловленности $\kappa(\boldsymbol{A})$ применяется левостороннее предобусловливание с матрицей $\boldsymbol{M}$. В данной работе, с целью минимизации дополнительных вычислительных затрат, выбран диагональный предобусловливатель Якоби: $\boldsymbol{M} = \mathrm{diag}(\mathbf{A})$.

Итерационная процедура PCG на m-м шаге выполняется следующим образом [5]:

$$1.\ \alpha_m = \frac{\boldsymbol{r}_m^H \boldsymbol{z}_m}{\boldsymbol{p}_m^H \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}_m},$$
$$2.\ \boldsymbol{w}_{m+1} = \boldsymbol{w}_m + \alpha_m \boldsymbol{p}_m,$$
$$3.\ \boldsymbol{r}_{m+1} = \boldsymbol{r}_m - \alpha_m \boldsymbol{A} \boldsymbol{p}_m,$$
$$4.\ \boldsymbol{z}_{m+1} = \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{r}_{m+1},$$
$$5.\ \beta_m = \frac{\boldsymbol{r}_{m+1}^H \boldsymbol{z}_{m+1}}{\boldsymbol{r}_m^H \boldsymbol{z}_m},$$
$$6.\ \boldsymbol{p}_{m+1} = \boldsymbol{z}_{m+1} + \beta_{\mathrm{m}} \boldsymbol{p}_m.$$

Фиксированное число итераций в PCG является неоптимальным. Предлагаем определять точку остановки m_{opt} адаптивно с помощью классификатора на основе полносвязной нейронной сети [6, 7].

1. Входные данные: Вектор признаков $\boldsymbol{f} \in \mathbb{R}^7$, включающий значение SNR, числа обусловленности $\kappa(\boldsymbol{H})$ и $\kappa(\boldsymbol{R}_T)$, а также экстремальные собственные числа матриц канала.

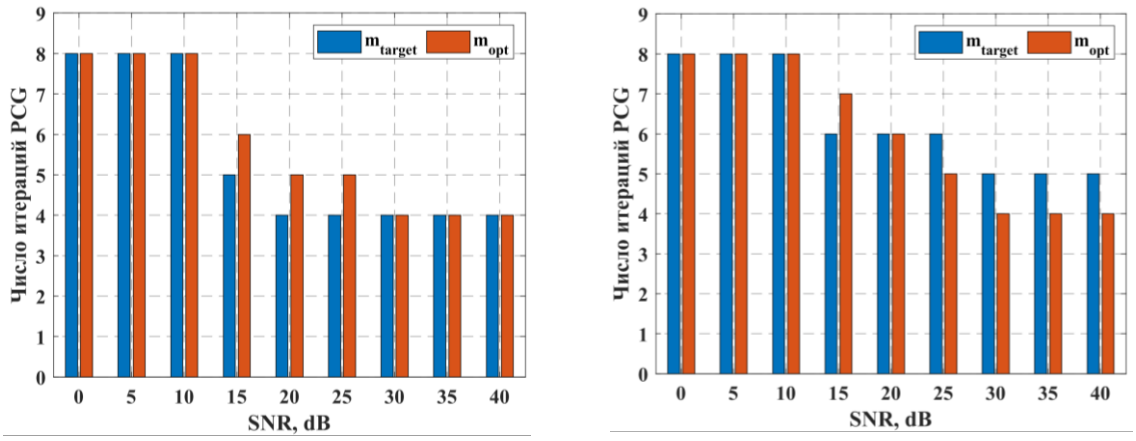
2. Архитектура: Сеть состоит из трех скрытых слоев (64, 128, 64 нейронов) с функцией активации ReLU. Выходной слой использует функцию Softmax для классификации оптимального числа итераций m_{opt}.

3. Обучение: Модель обучается оффлайн на наборе данных, где меткой m_{target} является минимальное число итераций, обеспечивающее целевой уровень коэффициента битовых ошибок (Bit Error Rate, BER).

Таким образом, на этапе передачи система вычисляет признаки канала, предсказывает m_{opt} и выполняет ровно столько итераций PCG, сколько необходимо для текущего состояния канала, минимизируя вычислительную задержку.

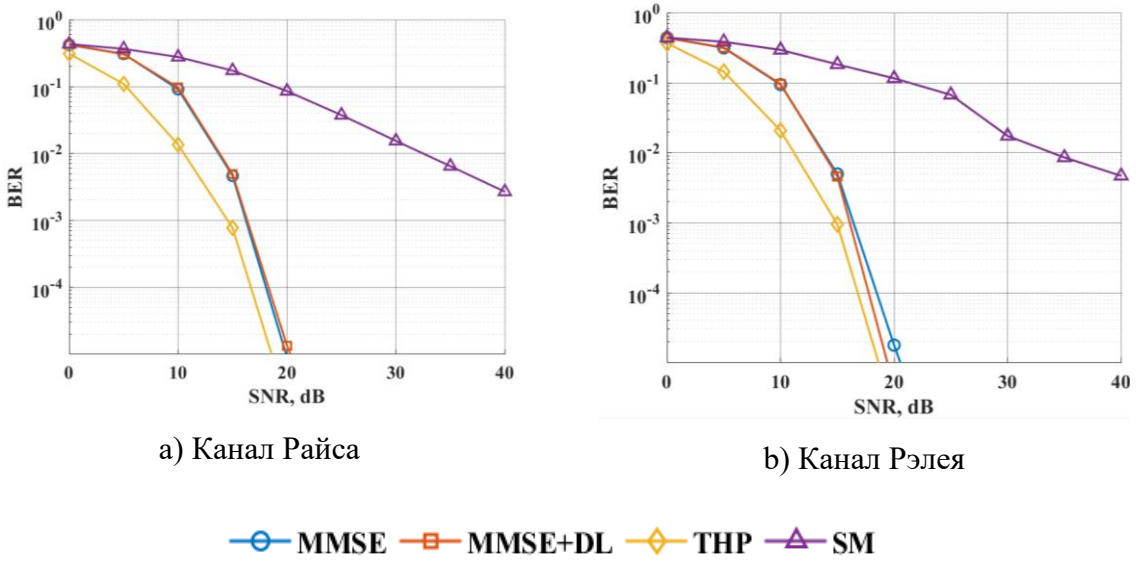
Результаты моделирования. Численный эксперимент проводился для системы MU-MIMO нисходящей связи с конфигурацией антенной решетки 8×8 ($N_T = 8$, обслуживающими $N_U = 8$). Для оценки робастности алгоритма рассматривались различные сценарии распространения радиоволн, включая каналы с замираниями Райса и Рэлея и высокой пространственной корреляцией на передающей стороне (коэффициент корреляции $\rho = 0.8$), что создает условия плохой обусловленности канальной матрицы и представляет наибольшую сложность для итерационных алгоритмов.

Для оценки точность работы предлагаемого механизма управления сложностью, на рис. 1 приведено сравнение целевого числа итераций m_{target}, полученного путем поиска на основе результатов вычисления BER, и прогнозируемого значения m_{opt}, выработанного нейронной сетью.



a) Канал Райса b) Канал Рэлея

Рис. 1. Эффективность нейросетевого прогнозирования оптимального числа итераций PCG



a) Канал Райса

b) Канал Рэлея

Рис. 2. Анализ влияния адаптивного выбора числа итераций PCG на производительность алгоритмов предкодирования

На рис. 2 представлены кривые зависимости BER от SNR для четырех исследуемых сценариев: пространственное мультиплексирование без прекодирования (Spatial Multiplexing, SM), нелинейное прекодирование Томлинсона-Харашимы (Tomlinson-Harashima Precoding, THP), классическое линейное прекодирование MMSE и предлагаемый гибридный алгоритм (MMSE+DL).

В данной работе решена задача оптимизации вычислительной сложности линейного прекодирования в системах нисходящей связи MU-MIMO путем разработки гибридного алгоритма, интегрирующего итерационный метод PCG и модуль управления на основе глубокой нейронной сети. Результаты численного моделирования подтвердили гипотезу о том, что фиксированное число итераций в традиционных алгоритмах является избыточным. Разработанный механизм нейросетевой адаптации продемонстрировал способность динамически определять оптимальную точку остановки алгоритма, существенно сокращая вычислительные затраты в условиях высокого SNR или при наличии прямой видимости (канал Райса). Принципиально важным результатом исследования является то, что достигнутое снижение сложности не сопряжено с потерями в качестве связи: сравнительный анализ показал полное совпадение кривых помехоустойчивости (BER) предлагаемого адаптивного метода и эталонного алгоритма с точным обращением матрицы как для каналов Райса, так и для коррелированных каналов Рэлея.

Список используемых источников

1. Крейнделин В. Б., Смирнов А. Э., Бен Режеб Т. Б. К. Эффективность методов обработки сигналов в системах MU-MIMO высоких порядков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 12. С. 24–30.
2. Albreem M. A., Alsharif M. H., Kim S. A. Low Complexity Near-Optimal Iterative Linear Detector for Massive MIMO in Realistic Radio Channels of 5G Communication Systems // Entropy. 2020. Vol. 22. N 4. Art. no. 388. DOI: 10.3390/e22040388.
3. McNamara D. P., Beach M. A., Fletcher P. N. Spatial correlation in indoor MIMO channels // Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Lisbon: IEEE, 2002. Vol. 1. P. 290–294. DOI: 10.1109/PIMRC.2002.1046707.
4. Subitha D., Vani R. Analysis of Linear Precoding Techniques for Massive MIMO-OFDM Systems under various scenarios // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1084. Art. no. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/1084/1/012053.
5. Yin B., Wu M., Cavallaro J. R., Studer C. Conjugate gradient-based soft-output detection and precoding in massive MIMO systems // 2014 IEEE Global Communications Conference. Austin, USA: IEEE, 2014. P. 3696–3701. DOI 10.1109/GLOCOM.2014.7037382.
6. Zhou Z., Niu Y., Wan B., Zhou W. Anti-Jamming Communication Using Imitation Learning // Entropy. 2023. Vol. 25. N 11. Art. no. 1547. DOI: 10.3390/e25111547.
7. Gavenski N., Meneguzzi F., Luck M., Rodrigues O. A Survey of Imitation Learning Methods, Environments and Metrics // Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems. 2024. Vol. 8. N 1. Art. no. 21. P. 1–35. DOI: 10.1145/3643807.

REDUCING COMPUTATIONAL COMPLEXITY OF LINEAR PRECODING IN MU-MIMO SYSTEMS USING DEEP LEARNING

Vu D., Glushankov E., Pham Q.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The proliferation of antennas in emerging wireless communication systems leads to a critical surge in the computational complexity of digital signal processing algorithms, particularly during the precoding stage. The conventional linear Minimum Mean Square Error (MMSE) algorithm necessitates matrix inversion operations, whose complexity scales cubically with the system dimensions, thereby hindering real-time implementation. In this paper, an efficient iterative method for matrix inversion approximation is proposed, based on the Preconditioned Conjugate Gradient (PCG) algorithm. The primary novelty of this research lies in the development of an intelligent iteration adaptation mechanism leveraging deep neural networks. Simulation results demonstrate that the proposed hybrid approach achieves an error performance comparable to the direct inversion method while significantly reducing computational overhead, especially in correlated channel environments.

Key words: MU-MIMO systems, MMSE precoding, Computational complexity, Conjugate Gradient method, Deep Learning

УДК 621.396
ГРНТИ 47.05.03

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА

Е. В. Галузов[1], К. В. Гольдибаев[1], Е. А. Рылов[2], А. В. Сорокин[1]

[1]АО «Проектно-конструкторское бюро «РИО»
[2]АО «НПО «Завод «Волна»

В статье приводится обзор основных способов расширения спектра: линейная частотная модуляция – ЛЧМ (CSS), расширение спектра методом прямой последовательности – МПП (DSSS) и псевдослучайная перестройка рабочей частоты – ППРЧ (FHSS). Рассмотрен метод комбинированного расширения спектра: применение ЛЧМ сигналов в режиме ППРЧ. Проведено исследование комбинированного метода модуляции: применение ЛЧМ сигналов в режиме МПП. Исследована математическая модель ЛЧМ-МПП (CSS-DSSS) модулятора в среде Matlab, исследованы автокорреляционные функции сгенерированных сигналов и методы их оптимизации. Предложен комбинированный метод ЛЧМ-МПП-ППРЧ (CSS-DSSS-FHSS). Произведен анализ эффективности предложенных методов комбинированного расширения спектра.

широкополосная модуляция; методы расширение спектра; комбинированная модуляция; линейная частотная модуляция ЛЧМ (CSS); расширение спектра методом прямой последовательности МПП (DSSS); псевдослучайная перестройка рабочей частоты ППРЧ (FHSS)

I. Введение

Существуют различные методы расширения спектра [1-7], среди которых наибольшее распространение получили три метода: линейная частотная модуляция (ЛЧМ), метод расширения спектра прямой последовательностью (МПП), псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ). В первую очередь они оказались востребованы благодаря высокой помехозащищенности, сложности обнаружения факта работы системы связи и низкой вероятности перехвата сигнала.

1. Расширение спектра методом линейной частотной модуляции – ЛЧМ (CSS)

Частота несущего радиосигнала в зависимости от времени либо нарастает (UpChirp), либо убывает (DownChirp) по некоему линейному закону (см. рис. 1). Ранее ЛЧМ модуляция применялась в основном в радиолока-

ции, так как на приемнике, благодаря острой автокорреляционной функции (АКФ), можно с высокой точностью установить время отклика от цели. Однако на сегодняшний день ЛЧМ активно применяться в системах связи, особенно при работе в сложной помеховой обстановке [4].

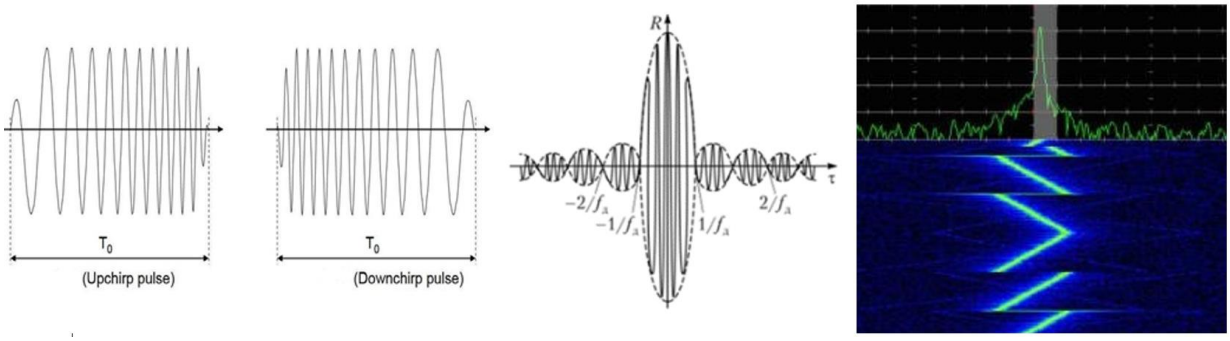


Рис. 1. ЛЧМ импульсы типа UpChirp и DownChirp. АКФ ЛЧМ сигнала. Прием ЛЧМ сигнала в окне водопада SDR-приемника

2. Расширение спектра методом прямой последовательности – МПП (DSSS)

При расширении спектра методом прямой последовательности (МПП) [1, 2] в каждый передаваемый информационный бит (логический 0 или 1) встраивается псевдослучайная последовательность (ПСП) (см. рис. 2). Используемые для расширения спектра сигнала ПСП должны удовлетворять определенным требованиям автокорреляции, и взаимокорреляции при кодовом разделении каналов, для дальнейшего выделения приемником информационного сигнала на уровне шума.

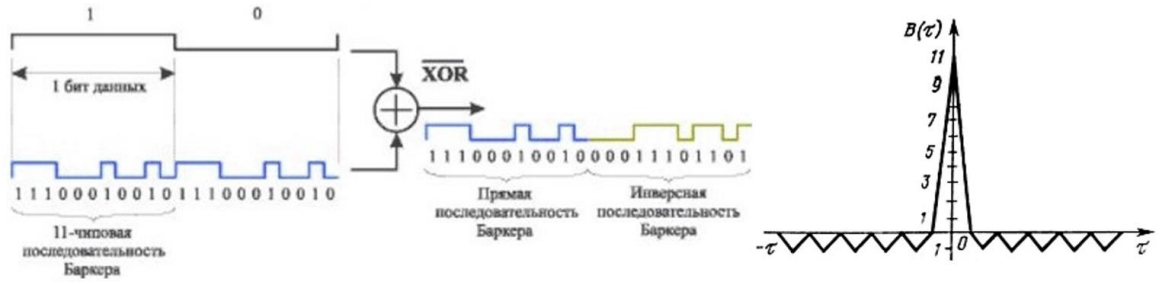


Рис. 2. Расширение спектра 11-элементным кодом Баркера и его АКФ

Степень расширения прямо зависит от скорости передачи псевдослучайной последовательности. Максимум АКФ превышает уровень боковых лепестков в число раз, равное числу элементов кода.

3. **Расширение спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты – ППРЧ (FHSS)**

Расширение спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) [1, 2] заключается в частой смене несущей частоты в пределах широкого диапазона, что не допускает перехват или радиоподавление узкополосным шумом. Частота меняется в соответствии с ПСП, известной как отправителю, так и получателю (см. рис. 3).

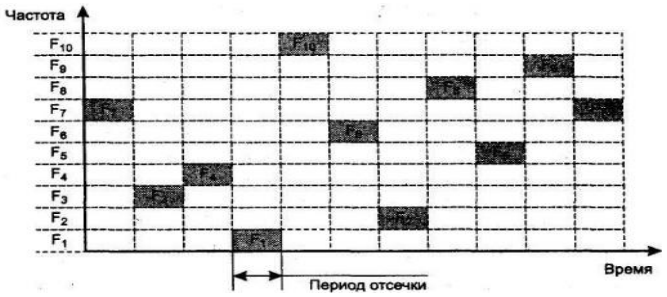


Рис. 3. Структура ППРЧ сигнала

II. Комбинированные методы расширения спектра

Исследование расширения спектра методом комбинирования ППРЧ-ЛМЧ (FHSS-CSS)

Современные реалии требуют новых подходов к передаче информации с более высокой степенью точности и защиты, одним из таких методов стало комбинирование ППРЧ и ЛЧМ. Основой для данного комбинированного метода послужили популярный на сегодняшний день LoRa протокол обмена [3] (см. Рис. 4) и программно-реализованная ППРЧ на цифровом сигнальном процессоре.

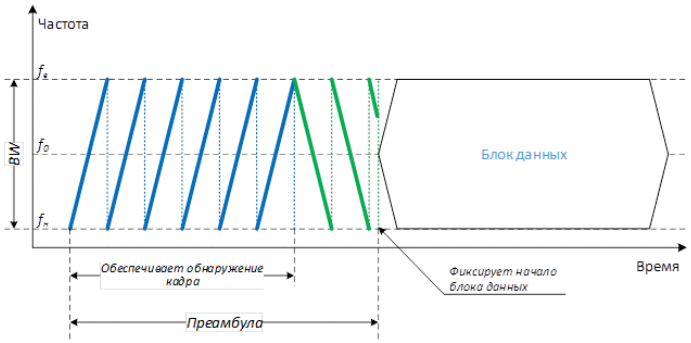


Рис. 4. Структура LoRa-сигнала

LoRa сигнал крайне устойчив к сосредоточенным помехам. Как показывает практика, для подавления такого канала связи требуется генерировать ПСП сигнал с параметрами ЛЧМ-импульсов, идентичными полезному сигналу.

В технологии ELRS (см. рис. 5) за основу взят протокол LoRa, но при передаче применяется ППРЧ, что дополнительно усложняет перехват и подавление такого радиоканала.

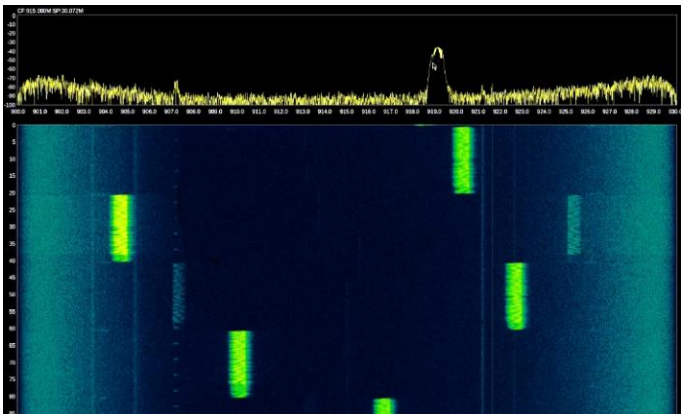


Рис. 5. Сигнал, модулированный комбинированным методом ППРЧ-ЛЧМ в окне водопада SDR-приемника

Исследование расширения спектра методом комбинирования МПП-ЛМЧ (DSSS-CSS)

При использовании данного метода каждый бит информации кодируется ПСП, имеющей острую АКФ, но при этом, каждый элемент ПСП представляет собой ЛЧМ импульс, имеющий свою острую АКФ (см. рис. 6). Была построена и исследована математическая модель модулятора МПП-ЛЧМ в среде Matlab [6].

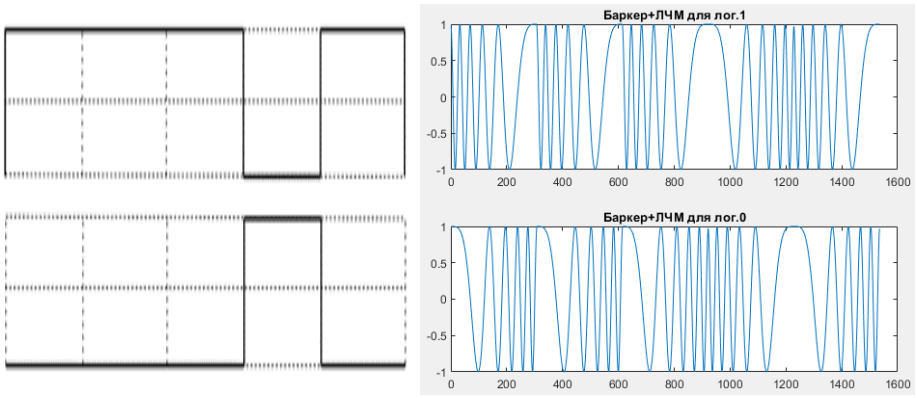


Рис. 6. 5-элементный код Баркера модулированный ЛЧМ-импульсами

Для качественной оценки преимуществ модулированного сигнала комбинированным методом над классической модуляцией с прямым расширением спектра был сформирован 5-элементный код Баркера, модулированный в первом случае сигналом с двоичной фазовой манипуляцией ДФМ

(BPSK) – МПП (DSSS), а во втором случае последовательностью оптимизированных по характеристикам ($f_н$ и $f_в$) ЛЧМ импульсов (см. Рис. 7) – МПП-ЛЧМ (DSSS-CSS), при одинаковой центральной частоте сигналов.

На рисунке виден выигрыш по уровню максимума АКФ на 0,52 дБ в случае МПП-ЛЧМ. Уровень боковых лепестков (УБЛ) в случае МПП-ДФМ составляет -3,62 дБ, а в случае МПП-ЛЧМ -5,44 дБ.

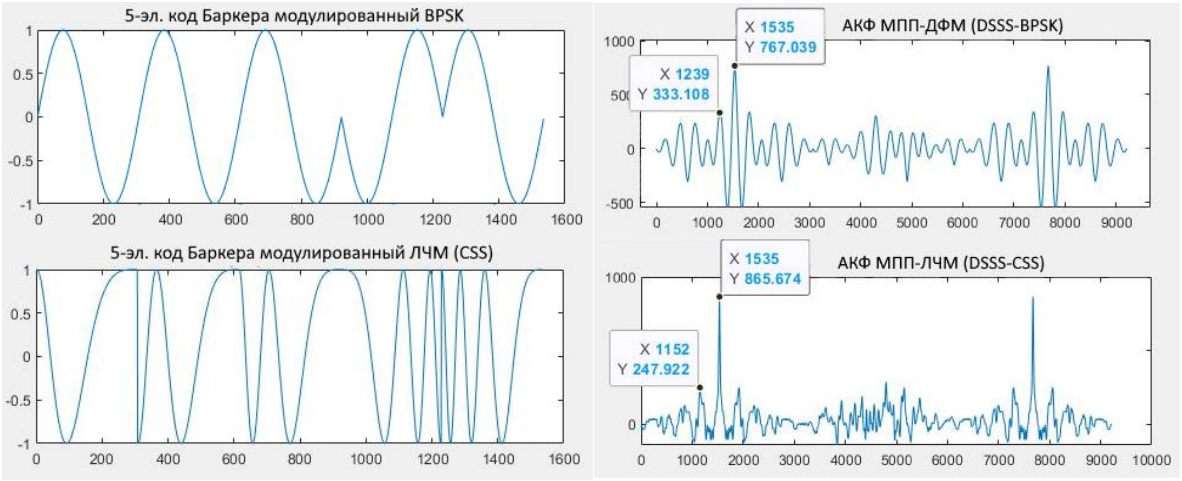


Рис. 7. Слева 5-элементный код Баркера, модулированный ДФМ и ЛЧМ. Справа – АКФ при приеме логической последовательности «101» модулированной двумя способами

Также сгенерированные сигналы были исследованы при прохождении через канал с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при соотношении С/Ш = -10 дБ. Результаты представлены на Рис. 8. Выигрыш по уровню максимума АКФ в случае модуляции МПП-ЛЧМ составляет 1,99 дБ по отношению к МПП. УБЛ в случае МПП составляет -1,85 дБ, а случае МПП-ЛЧМ -4,34 дБ.

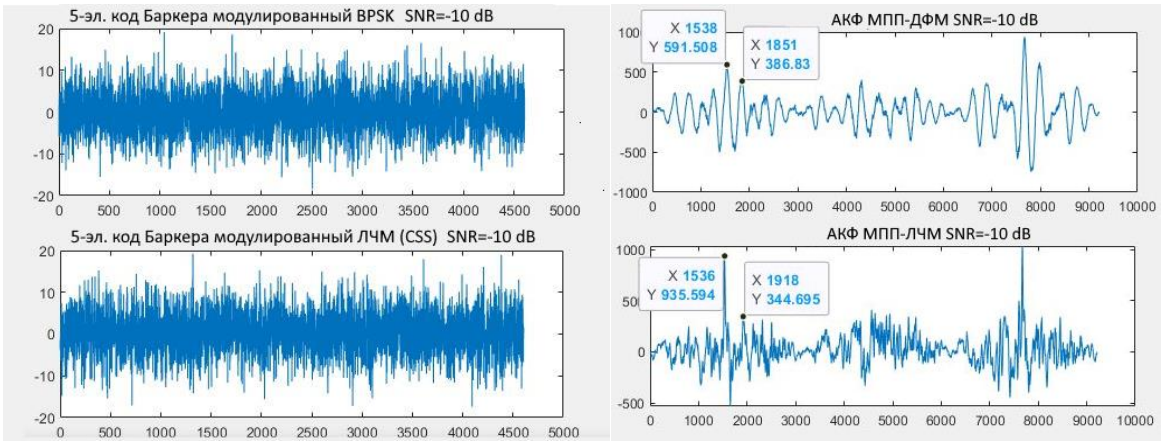


Рис. 8. Слева – 5-элементный код Баркера модулированный ДФМ и ЛЧМ, прошедший через канал с АБГШ С/Ш=-10 дБ. Справа – АКФ при приеме логической последовательности «101» (при С/Ш=-10 дБ)

Исследование АКФ комбинированного сигнала показало существенный выигрыш по сравнению с АКФ только ЛЧМ-сигнала или МПП-модулированного сигнала.

III. Заключение.

Разработанная модель комбинированного способа модуляции позволяет проводить исследования более сложных ПСП для получения МПП-ЛЧМ сигналов и анализа их характеристик. Сгенерированные и оптимизированные с помощью данной модели сложные сигналы могут также быть усложнены передачей в режиме ППРЧ формируя ЛЧМ-МПП-ППРЧ (CSS-DSSS-FHSS) сигнально-кодовую конструкцию, что дополнительно повысит скрытность и помехозащищенность радиоканала.

Список используемых источников

1. Надымов А. В., Титов П. Л. Перспективные средства связи: учебное пособие для вузов. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2015.

2. Феер К. Беспроводная цифровая связь, методы модуляции и расширения спектра. Перевод с англ. / Под ред. В. И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000

3. Системы широкополосного радиодоступа 4 поколения: выбор сигнально-кодовых конструкций / В. Николаев, А. Гармонов, Ю. Лебедев // Первая миля. 2010. Т. 20-21, № 5-6. С. 56-59. EDN PBFTHH.

4. Кириллов С. Н., Лукашин И. В. Анализ эффективности функционирования профиля CSS стандарта IEEE 802.15.4a в условиях действия мешающих факторов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 52. С. 6-10.

5. Чебыкин А. Е. Гибридная модуляция с применением прямого расширения спектра и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского: Материалы конференции, Москва: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2017. С. 191-192.

6. Исследование комбинированных методов широкополосной модуляции цифровых сигналов / А. В. Сорокин, Е. А. Рылов, К. В. Гольдибаев, Е. В. Галузов // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2025. № 1(80). С. 100-103. EDN: JDGHXH.

7. Технологии связи (iTech), официальный сайт. URL: https://itechinfo.ru/node/46 (дата обращения 10.12.2025).

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF COMPOSITE METHODS OF SPREAD SPECTRUM

Galuzov E.[1], Goldibaev K.[1], Rylov E.[2], Sorokin A.[1]
[1]AO Design Bureau RIO
[2]AO NPO Volna Plant

The article provides an overview of the main methods of spread spectrum: Chirp spread spectrum (CSS), Direct sequence spread spectrum (DSSS) and Frequency-hopping spread spectrum (FHSS). An overview of composite method spread spectrum: the use of CSS signals in the FHSS mode. A research of composite method spread spectrum has been done: the use of CSS signals in the DSSS mode. The mathematical model of the CSS-DSSS modulator in the Matlab environment was tested, the autocorrelation functions of the generated signals and methods of their optimization were investigated. The composite CSS-DSSS-FHSS method was proposed. The efficiency of the proposed methods of composite spread spectrum was analyzed.

Key words: broadband modulation; spectrum expansion methods; composite modulation; Chirp spread spectrum (CSS); Direct sequence spread spectrum (DSSS); Frequency-hopping spread spectrum (FHSS)

УДК 621.391:621.396
ГРНТИ 47.05.17

РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАНАЛА С К-РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЗАМИРАНИЙ НА ПЛИС

Е. И. Глушанков, С. А. Митянин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлена архитектура и аппаратная реализация приемного тракта системы связи с адаптивным фильтром Калмана (АФК) на основе стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) для платформы ПЛИС. Рассматривается задача оценки параметров радиоканала с замираниями, описываемыми К-распределением, которое характерно для распространения радиоволн над морской поверхностью. Предложенный адаптивный фильтр использует систему нечеткой логики (Fuzzy Logic) для динамической коррекции ковариационных матриц шума процесса Q и шума измерения R на основе анализа инновационной последовательности. Это позволяет компенсировать неточности априорных моделей канала и повысить устойчивость фильтрации в условиях нестационарных помех. Представлена реализация алгоритма на ПЛИС с использованием конечного автомата (FSM) для управления вычислительными этапами, блочной памяти (BRAM) для матричных операций и DSP-блоков для арифметики с фиксированной точкой. Приведены оценки утилизации ресурсов ПЛИС Xilinx Kintex-7, латентности обработки и производительности.

адаптивный фильтр Калмана, стохастические дифференциальные уравнения, К-распределение, нечеткая логика, ПЛИС, MIMO, оценка канала

Введение

Современные системы беспроводной связи функционируют в условиях сложной электромагнитной обстановки, характеризующейся многолучевым распространением, замираниями и нестационарными помехами. Для эффективной работы приемного тракта требуется точная оценка параметров канала в реальном времени с минимальной латентностью.

Традиционные подходы к оценке канала основаны на фильтре Калмана с фиксированными параметрами, что требует априорного знания статистик шумов процесса и измерения [1]. Однако в реальных условиях эти параметры могут изменяться, что приводит к ухудшению качества оценки или даже к дивергенции фильтра [2].

В работах [3, 4] показано, что использование стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) позволяет более точно моделировать эволюцию коэффициентов канала с негауссовскими распределениями, в частности, с К-распределением, характерным для городской застройки. В данной работе предлагается адаптивный фильтр Калмана (АФК) на основе СДУ с динамической коррекцией параметров с использованием нечеткой логики, а также представлена его аппаратная реализация на ПЛИС.

Общая архитектура системы связи

В данной работе рассматривается MIMO-система 2x2 с пространственно-временным кодированием по схеме Аламоути, а также с применением сверточного помехоустойчивого кодера. На рисунке 1 приведена общая архитектура передающего тракта, а на рисунке 2 – архитектура приемного тракта. Основное внимание уделяется блоку оценки канала с применением адаптивного фильтра Калмана.

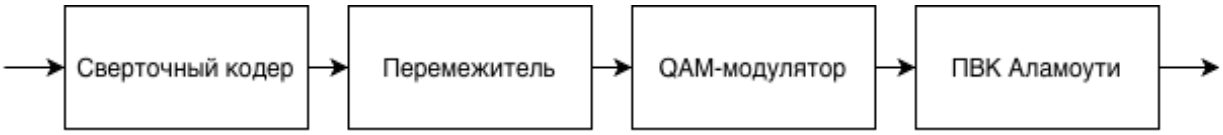


Рис. 1. Архитектура передающего тракта.

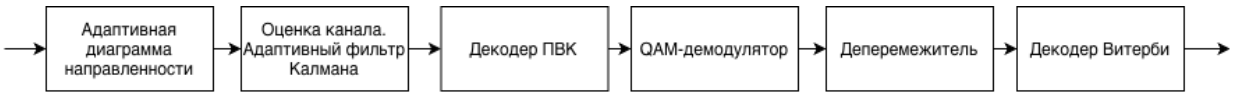


Рис. 2. Архитектура приемного тракта

Математическая модель канала и АФК

Для К-распределения в [3] была выведена следующая форма стохастического дифференциального уравнения:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{b_0}{2}\left[\frac{\nu+1}{x(t)^{\nu}} - b\frac{K_{\nu}(bx(t))}{K_{\nu-1}(bx(t))}\right] - \sqrt{2b_0}\nu(t),$$

где K – модифицированная функция Бесселя второго рода, $\nu = \alpha$ – параметр формы, $b = {}^{\alpha}/_{\mu}$ – параметр масштаба, b_0 – коэффициент диффузии для стационарного случая.

Аппаратная реализация на ПЛИС

Дискретизация СДУ для К-распределения методом Эйлера-Маруямы требует вычисления отношения модифицированных функций Бесселя вто-

рого рода $\frac{K_\nu(bx(t))}{K_{\nu-1}(bx(t))}$, что представляет основную вычислительную сложность для ПЛИС.

Для реализации использован метод предвычисленных таблиц (LUT) с линейной интерполяцией. Таблица предварительно генерируется в MATLAB и загружается в BRAM при конфигурации ПЛИС. Одна LUT используется совместно всеми четырьмя каналами MIMO 2×2, что минимизирует затраты памяти. Также LUT используется для определения x^ν.

Итоговая схема реализации дискретизации СДУ для К-распределения АФК приведена на рисунке 3.

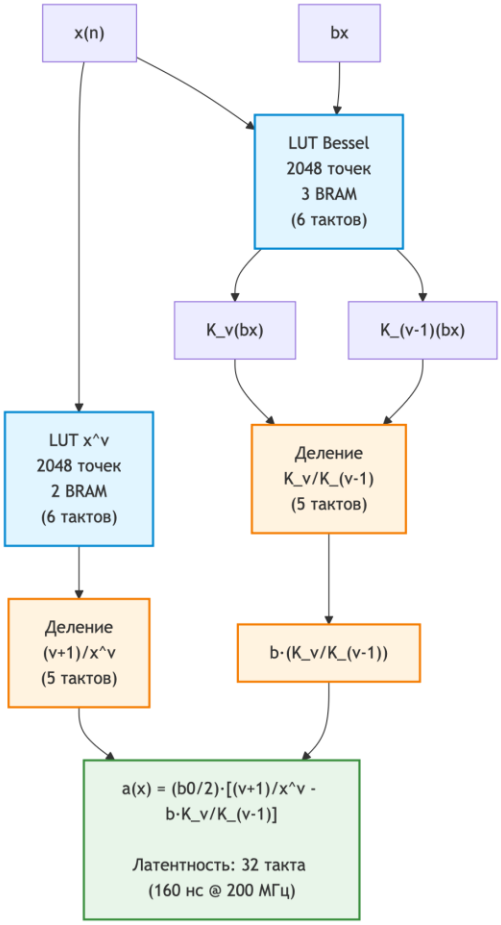


Рис. 3. Схема реализации дискретизации СДУ для К-распределения на ПЛИС

Классический фильтр Калмана требует задания двух параметров – ковариации шума процесса Q и ковариации шума измерения R. В реальных условиях Q и R неизвестны и изменяются во времени.

Для решения этой проблемы используется адаптация на основе нечеткой логики. Анализируется инновационная последовательность – разность между измерением и предсказанием. Если инновация мала, то модель точна

и параметры уменьшаются, если инновация велика, то модель неточна, параметры увеличиваются, при средней инновации сохраняются номинальные параметры. Адаптер нечеткой логики также, как и модуль дискретизации СДУ, использует LUT для функций принадлежности.

При допущении статистической независимости коэффициентов канала между разными парами антенн ковариационную матрицу ошибки оценивания в фильтре Калмана предлагается хранить в блочно-диагональном виде как четыре блока 2×2, соответствующих независимым комплексным коэффициентам канала. Это снижает требования к памяти с 64 до 16 элементов (экономия в 4 раза) и уменьшает вычислительную сложность матричных операций в 16 раз.

Модуль адаптивного фильтра Калмана включает: блок извлечения пилот-символов, основное ядро фильтра Калмана, адаптер нечеткой логики и монитор инновации для вычисления. Выход модуля: оценка канала. Управление состоянием осуществляется через FSM (Finite-State Machine).

Аппаратную реализацию АФК предлагается выполнить на ПЛИС Xilinx Kintex-7 XC7K325T-2. Предполагаемая утилизация ресурсов при этом составит:

– 76 DSP блоков (9.0 % от доступных);
– 22 блока BRAM (4.9 %);
– 16190 LUT (7.9 %);
– 5675 триггеров (1.4 %);
– латентность обработки одного символа – 340 нс при тактовой частоте 200 МГц (68 тактов).

Сравнение с реализацией на CPU Intel i7-10700K @ 3.8 ГГц показало ускорение в 15 раз по латентности и в 2500 раз по энергоэффективности (0.56 Вт против 95 Вт). Детерминированная латентность ПЛИС обеспечивает преимущество для систем реального времени. Низкая утилизация ресурсов позволяет интегрировать дополнительные модули обработки сигналов или масштабировать до MIMO 4×4.

Заключение

Предложена и смоделирована на ПЛИС архитектура адаптивного фильтра Калмана на основе СДУ для К-распределения с динамической коррекцией параметров через нечеткую логику.

Реализацию АФК предлагается осуществить с использованием LUT для определения значений функций Бесселя, FSM для управления состоя-

нием АФК, а также с оптимизацией матричных операций через блочно-диагональную структуру. Применение этих подходов обеспечит латентность 155 нс при утилизации 15 % DSP на Kintex-7.

Список используемых источников

1. Сейдж Э., Мелс Дж., Теория оценивания и ее применение в связи и управлении, пер. с англ. под ред. проф. Б. Р. Левина. М.: Связь, 1976. 496 с.

2. Diniz P.S.R. Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation. Springer, 2020.

3. Глушанков Е. И., Конторович В. Я., Митянин С. А., Кондрашов З. К. Анализ особенностей применения стохастических дифференциальных уравнений при моделировании случайных процессов, имеющих распределение Рэлея, гамма-распределение и K-распределение // Радиотехника, 2025, Т. 89, № 6, С. 14–23.

4. Глушанков Е. И., Митянин С. А. Исследование алгоритмов фильтрации в непрерывных радиоканалах с негауссовскими распределениями параметров // Радиотехника, 2026 (принята к опубликованию).

FPGA IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE KALMAN FILTER WITH FUZZY LOGIC FOR K-DISTRIBUTED FADING CHANNEL ESTIMATION

Glushankov E., Mityanin S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents the architecture and hardware implementation of a communication system receiver chain with an adaptive Kalman filter (AKF) based on stochastic differential equations (SDEs) for FPGA platforms. The problem of estimating radio channel parameters with fading characterized by K-distribution is considered, which is typical for radio wave propagation over sea surfaces.

The proposed adaptive filter employs a fuzzy logic system for dynamic correction of process noise covariance matrix Q and measurement noise covariance matrix R based on the analysis of the innovation sequence. This enables compensation for inaccuracies in a priori channel models and improves filtering robustness under non-stationary interference conditions.

An FPGA-based algorithm implementation is presented utilizing a finite state machine (FSM) for controlling computational stages, block RAM (BRAM) for matrix operations, and DSP blocks for fixed-point arithmetic.

Resource utilization estimates for Xilinx Kintex-7 FPGA, processing latency, and throughput performance are provided.

Key words: adaptive Kalman filter, stochastic differential equations, K-distribution, fuzzy logic, FPGA, MIMO, channel estimation

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.29

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МАТРИЦ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Е. И. Глушанков, А. А. Хренов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Системы радиомониторинга работают в быстроменяющейся сигнально-помеховой обстановке. В таких условиях необходимо, чтобы обеспечивалось своевременное определение характеристик и пространственных параметров полезных сигналов источников радиоизлучения. В работе представлены результаты проверки теоретических данных и работоспособности метода обнаружения сигналов на основе вычисления разностных корреляционных матриц входных воздействий, полученных при изменяющейся сигнально-помеховой обстановке.

радиомониторинг, сигнально-помеховая обстановка, антенная решетка, корреляционная матрица, источник радиоизлучения.

В средствах радиомониторинга зачастую задачи обнаружения, оценивания параметров, определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) решаются последовательно, что влечет за собой увеличение времени реакции системы на изменение радиоэлектронной обстановки (РЭО). В условиях сложной РЭО необходимо, чтобы обеспечивалось своевременное определение характеристик и пространственных параметров полезных сигналов ИРИ. Одним из способов оценки изменения сигнально-помеховой обстановки (СПО) может быть метод обнаружения сигналов на основе вычисления разностных корреляционных матриц (РКМ) входных воздействий.

Целью работы является проверка теоретических данных и работоспособности метода оценки изменения сигнально-помеховой обстановки на основе вычисления разностной корреляционной матрицы.

Для моделирования в программной среде MATLAB была выбрана двухэлементная линейная антенная решетка с расстоянием между элементами $d = 0{,}5\lambda$, которая принимает частотно-модулированные сигналы [1], параметры которых приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры исследуемых сигналов

Параметры	Частота, кГц	Угол прихода, º	Амплитуда, В	Длительность, мс	Девиация, кГц
Сигнал 1	120	15	1	2	10
Сигнал 2	50	60			
Сигнал 3	85	-35			

Спектры исследуемых сигналов представлены на рисунке 1.

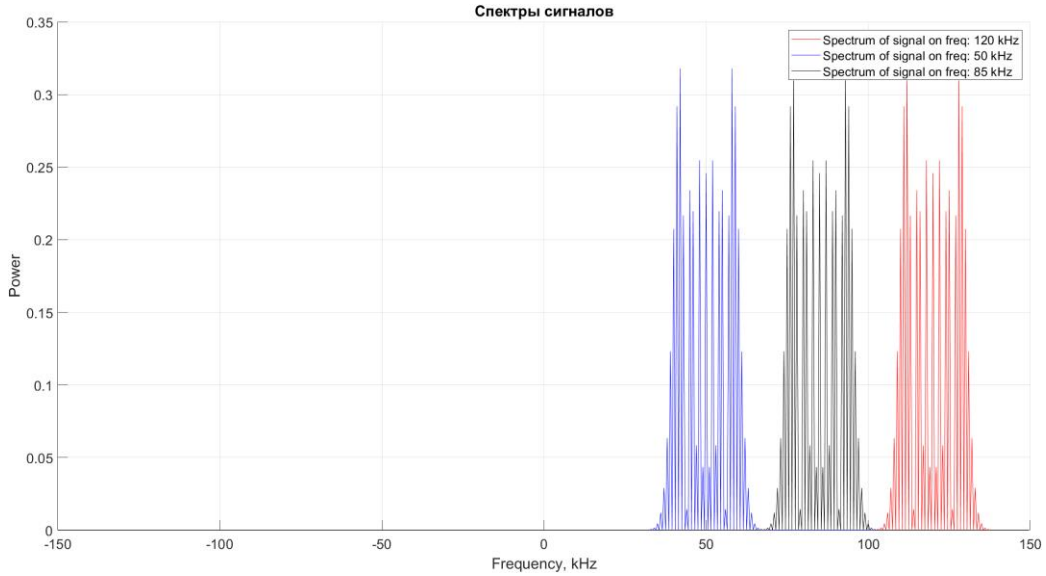


Рис. 1. Спектры исследуемых сигналов

В ходе моделирования для формирования на антенных элементах откликов входного воздействия $X_i(t)$, к полезным сигналам $S_i(t)$ был добавлен аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) $n_i(t)$, где i = 1,2,3:

$$X_i(t) = S_i(t) + \text{п}_i(t).$$

Затем были сформированы различные комбинации входных последовательностей, а именно:

$$Y_1(t) = X_1(t) + X_2(t) + X_3(t);$$

$$Y_2(t) = X_1(t) + X_2(t);$$

$$Y_3(t) = X_1(t) + X_3(t);$$

$$Y_4(t) = X_2(t) + X_3(t).$$

После этого вычислены корреляционные матрицы (КМ) по следующей формуле [2, 3]:

$$R_{xxj}(t) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} Y_i(k) \cdot \dot{Y}_i^T(k),$$

где j – количество сформированных комбинаций $Y_j(t)$, N – число отсчетов. Также, используя вышеприведенное выражение, отдельно были вычислены корреляционные матрицы полезных сигналов с шумом R^0_{xx1}, R^0_{xx2}, R^0_{xx3} для $X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$ соответственно [4].

В таблице 2 представлены различные случаи изменения СПО и для определения сигналов, изменивших СПО, были вычислены РКМ по следующей формуле:

$$\Delta R_{xx} = R_{xx}(t-\tau) - R_{xx}(t),$$

где τ – время задержки КМ [5].

ТАБЛИЦА 2. Случаи для оценки СПО

№	Описание случая	Вычисление РКМ
1.	СПО не изменилась, действуют 3 сигнала	Rxx1(t–τ) – Rxx1(t)
2.	Сигнал 1 пропал, действую 2 сигнала	Rxx1(t–τ) – Rxx4(t)
3.	Сигнал 2 пропал, действую 2 сигнала	Rxx1(t–τ) – Rxx3(t)
4.	Сигнал 3 пропал, действую 2 сигнала	Rxx1(t–τ) – Rxx2(t)
5.	Появился сигнал 1, действуют 3 сигнала	Rxx4(t–τ) – Rxx1(t)
6.	Появился сигнал 2, действуют 3 сигнала	Rxx3(t–τ) – Rxx1(t)
7.	Появился сигнал 3, действуют 3 сигнала	Rxx2(t–τ) – Rxx1(t)

Графический результат расчета РКМ представлен на рисунке 2.

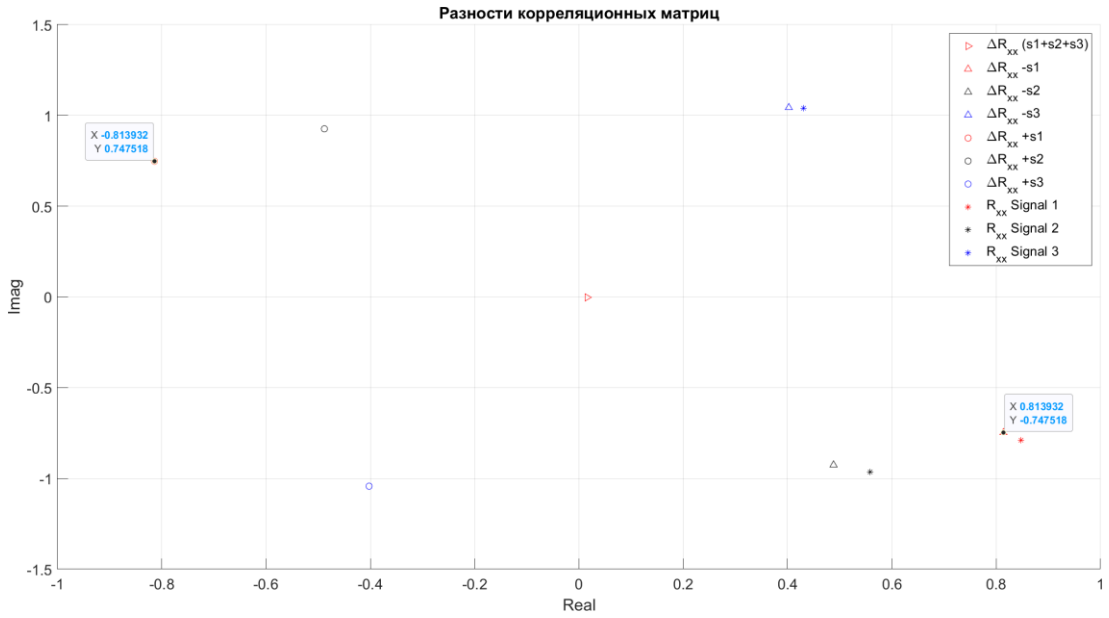


Рис. 2. Графический результат расчета РКМ

Из рисунка 2 видно, что при случае:

– № 1 – значение РКМ находится в окрестности нуля (красный «►»);
– № 2 – значение РКМ имеет смещение относительно нуля (красный «*») и практически совпадает с КМ пропавшего сигнала 1 (красный «Δ»);
– № 3, 4 – аналогично случаю № 2;
– № 5 – значение РКМ имеет смещение относительно нуля (красный «о») и абсолютно противоположно значению, полученного в случае № 2;
– № 6, 7 – аналогично случаю № 5.

Затем, если имеется приемлемое отношение сигнал-шум и задержка КМ крайне мала (такая, что за время τ СПО изменяется не более, чем на 1 сигнал), то по полученным РКМ с помощью алгоритмов сверхразрешения, например MUSIC [1], можно определить направление прихода сигнала, изменившего сигнально-помеховую обстановку. Результат работы алгоритма представлен на рисунке 3 для случая № 4 (таблица 2).

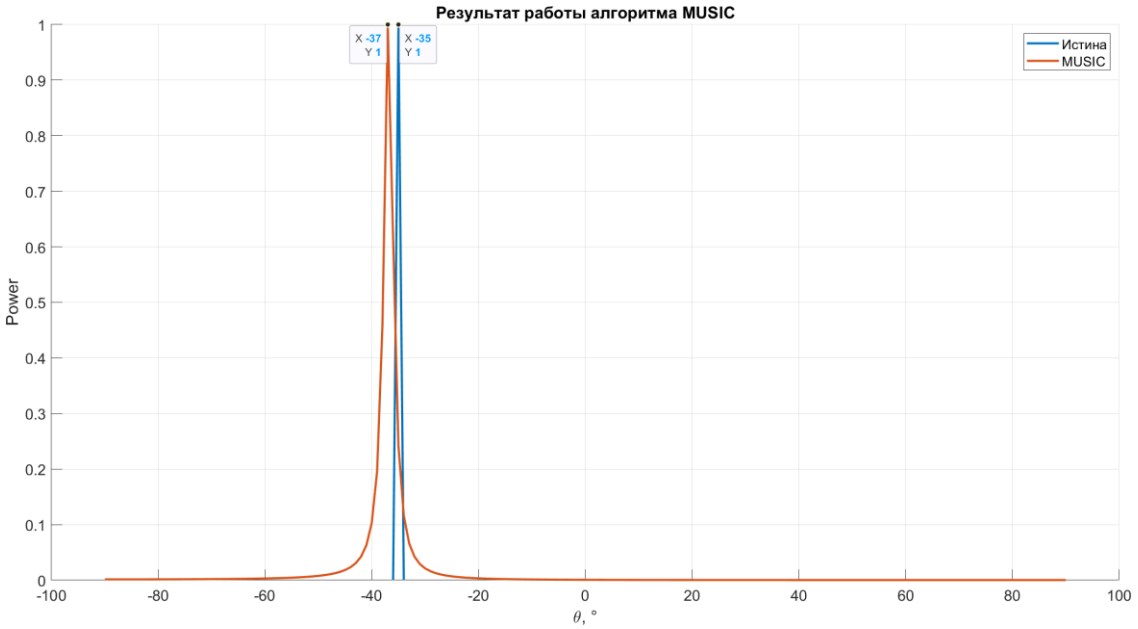


Рис. 3. Оценка направления прихода сигнала 3, пропавшего из эфира

Таким образом, полученные результаты подтвердили теоретические данные о том, что методика вычисления РКМ позволяет отследить изменение СПО.

Следует отметить, что вероятность выявления изменений СПО определяется насыщенностью СПО, ее динамичностью и значением интервала задержки КМ, а также выбором рационального времени задержки для формирования разностной корреляционной матрицы сигналов.

Список используемых источников

1. Van Trees H.L. Optimum Array Processing. P. IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. N.Y.: J.Wiley &Sons, Inc., 2002. 1470 p.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
3. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. Москва: Техносфера, 2013. 528 с.
4. Паршин Ю. Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех: учебное пособие. Москва: КУРС, 2024. 201 с.
5. Haykin S. S. Adaptive Filter Theory. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, Inc, 5th ed, 2014. 912 p.

IMPLEMENTATION OF SIGNAL DETECTION METHOD BASED ON ANALYSIS OF CORRELATION MATRICES OF INPUT SIGNALS

Glushankov E., Khrenov A.,
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Radio monitoring systems operate in a rapidly changing signal-and-interference environment. Under such conditions, it is essential to ensure timely determination of characteristics and spatial parameters of useful signals from radio emission sources. This paper presents results of verifying theoretical data and assessing performance of a signal detection method based on computation of differential correlation matrices of input signals acquired under varying signal-and-interference conditions.

Key words: radiomonitoring, signal-and-interference environment, antenna array, correlation matrix, radio emission source

УДК 621.391.812

ГРНТИ 49.43.29

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПВОС И ПРП

И. А. Горобцов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются предложения по построению системы, способной одновременно осуществлять оценку как сигналов с пространственно-временной обработкой, так и с пространственно-разнесенным приемом в составе одной антенной решетки. Система сравнивает оценочные значения отношения сигнал-шум на приемной антенной решетке и выдает решение, позволяющее улучшить вероятность ошибочного приема. Представлена структурная схема предлагаемого устройства.

пространственно-временная обработка сигналов, пространственно-разнесенный прием, уровень сигналов, отношение сигнал-шум, помехоустойчивость

Наличие в составе одного радиоэлектронного устройства многоэлементной антенной решетки, сложная помеховая обстановка, большое число абонентов – данные параметры ухудшают помехоустойчивость сигналов, влияя на электромагнитную обстановку приемного устройства. В радиосистемах методы повышения помехоустойчивости включают в себя использование алгоритмов коррекции ошибок, разработку эффективных методов модуляции сигналов, а также применение средств фильтрации и усиления сигналов. Повышение помехоустойчивости систем может быть достигнуто несколькими способами.

В работе рассматривается 16-элементная приемная антенная решетка с расстоянием между излучающими элементами, равным половине длины волны принимаемого сигнала. Конструкция антенной решетки в данном случае не важна, поскольку важным параметром является именно расстояние между излучающими элементами. Таким образом, представленные методы применимы как к коллинеарным решеткам, так и к круговым и прочим. Оценку помехоустойчивости целесообразно проводить по энергетическим показателям, а именно по значениям отношения мощности полезных сигналов к мощности помех и шумов (ОСПШ). Вследствие ухудшения электромагнитной обстановки, необходима разработка новых методов обработки сигналов, повышающих помехоустойчивость радионавигационных систем.

Суть первого метода состоит в применении пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), при условии, что расстояние между излучающими элементами l антенной решетки приравнивается к половине длины волны λ принимаемого сигнала (рис. 1). Работа алгоритма состоит в корреляционном анализе принятых сигналов, с помощью которого определяется матрица весовых коэффициентов [1]. На ее основе вычисляется ОСПШ и проводится оценка вероятности битовой ошибки в приеме навигационного сообщения и сравнивается с требуемым значением.

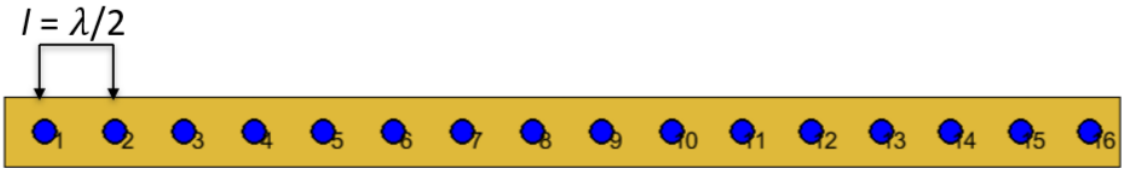


Рис. 1. Расстояние между излучающими элементами в составе 16-элементной антенной решетки для алгоритмов ПВОС

Структурная схема антенной решетки, осуществляющей работу данного алгоритма представлена на рисунке 2. Здесь ДОС – диаграммообразующая схема, $x_1,\ldots,x_N$ – принятые сигналы, $w_1,\ldots,w_N$ – весовые коэффициенты, y – выходной сигнал, УРАУ – устройство реализации алгоритма управления, УФОС – устройство формирования опорного сигнала.

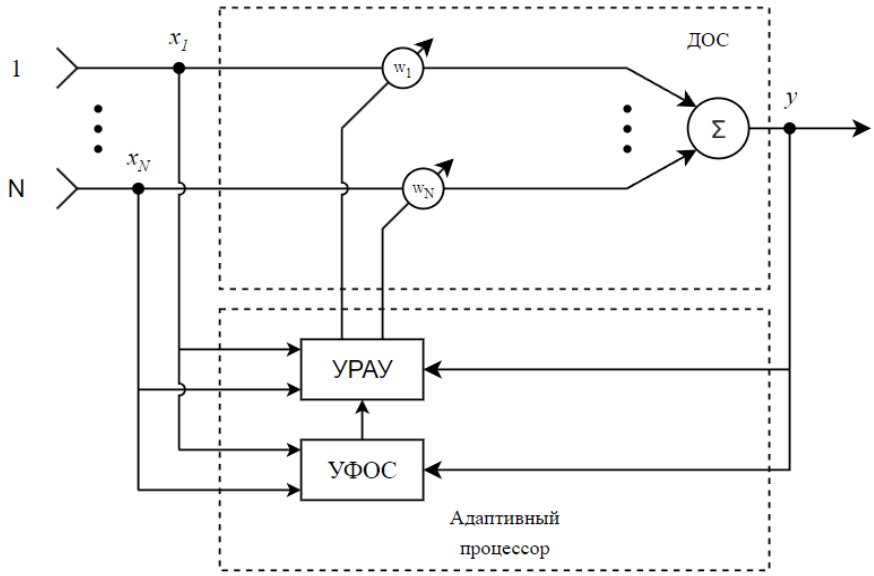


Рис. 2. Структурная схема N-элементной антенной решетки для алгоритма ПВОС

Второй метод заключается в применении алгоритмов пространственно-разнесенного приема (ПРП), когда расстояние между приемниками больше длины волны принимаемого сигнала (рис. 3).

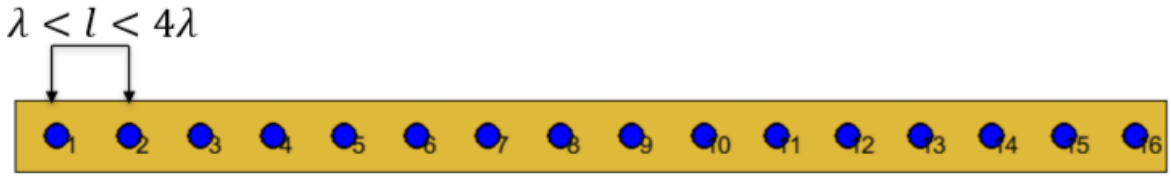


Рис. 3. Расстояние между излучающими элементами в составе 16-элементной антенной решетки для алгоритмов ПРП

Особенность данного метода заключается в том, что на все антенные элементы поступает одинаковые информационные сигналы, но ввиду различных путей распространения, их энергетические параметры различны [2], а помеховые сигналы некоррелированы между собой. Структурная схема антенной решетки, осуществляющей данный алгоритм представлен на рисунке 4 [3].

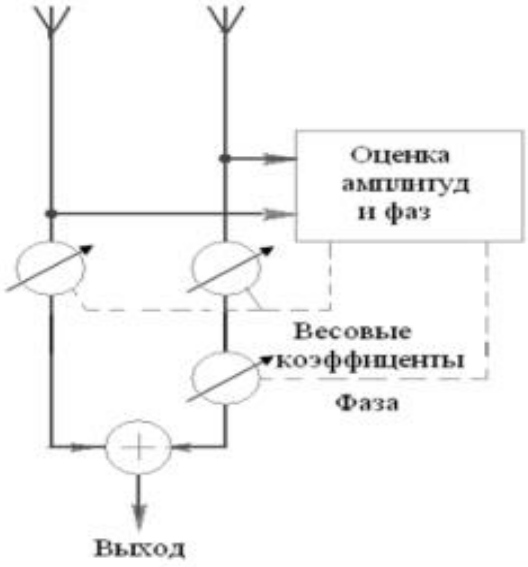


Рис. 4. Структурная схема *N*-элементной антенной решетки для алгоритма ПРП

Предлагается метод, осуществляющий совместную обработку алгоритмов ПВОС и ПРП в составе одной антенной решетки. В таком случае, для алгоритмов ПРП обработка сигналов будет осуществляться с нескольких излучающих элементов, расстояние между которыми больше длины волны, позволяющих исключить взаимную корреляцию (рис. 5). После обработки проводится их совместная оценка, на основе которой определяется вероятность битовой ошибки [4].

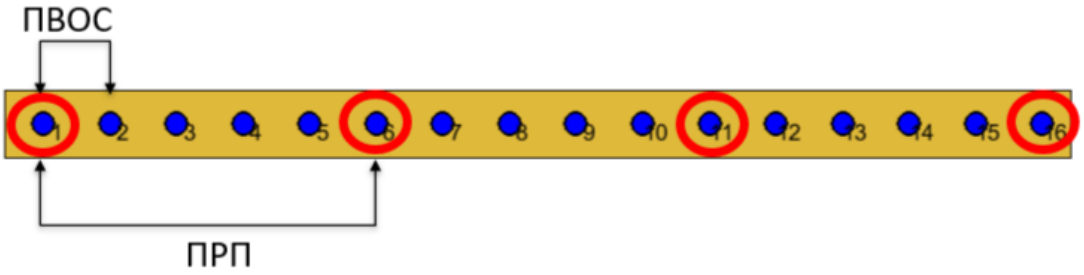


Рис. 5. Элементы, с которых будет осуществляться совместная обработка сигналов с помощью ПВОС и ПРП

Структурная схема антенной решетки, осуществляющей совместную обработку сигналов ПВОС и ПРП, представлена на рисунке 6.

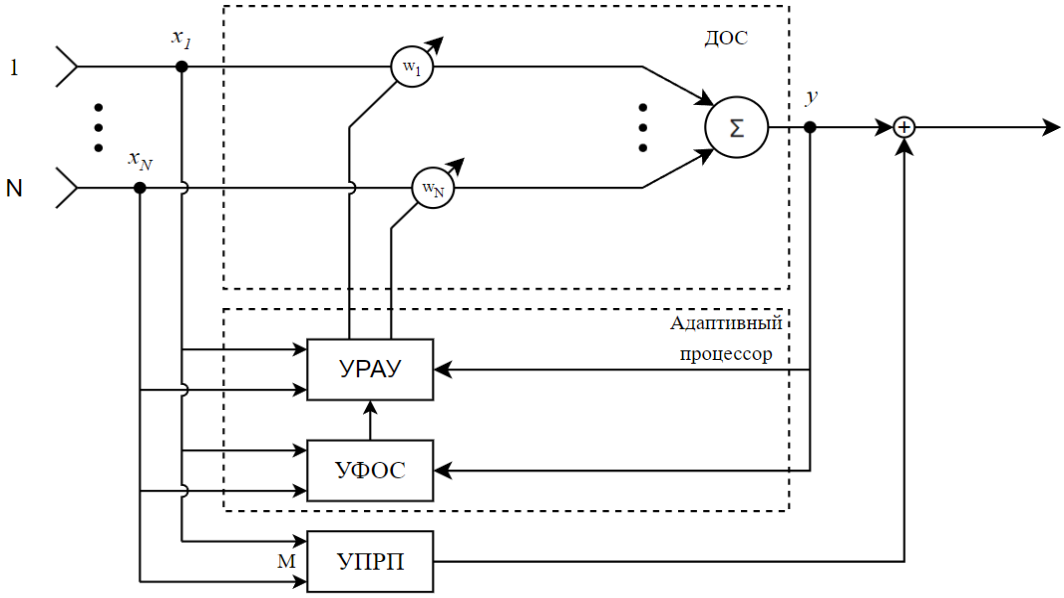


Рис. 6. Структурная схема антенной решетки, осуществляющей совместную обработку сигналов ПВОС и ПРП

Применение совместной оценки алгоритмов ПВОС и ПРП в составе одной антенной решетки способно повысить помехоустойчивость сигналов по критерию улучшения показателя ОСШП [5], в следствие чего возможно улучшение электромагнитной совместимости антенных элементов.

Список используемых источников

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

2. Флаксман А.Г. Адаптивная пространственная обработка сигналов в многоканальных информационных системах: дис. ... доктор техн. наук: 01.04.03 / Флаксман Александр Григорьевич. Нижний Новгород, 2004. 306 с.

3. Батенев М. К., Глушанков Е. И. Исследование совместного алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки и разнесенного приема // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024): Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. Санкт-Петербург, 03–05 декабря 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 593-596.

4. Кловский Д. Д., Конторович В. Я., Широков С. М. Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений/ Под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.

5. Варгаузин В. А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учеб. пособие / В. А. Варгаузин, И. А. Цикин. СПб.:БХВ-Петербург, 2013. 352 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры РТ СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Е. И. Глушанковым.

DESIGN OF A JOINT SIGNAL PROCESSING SYSTEM WITH SPACE-TIME PROCESSING AND SPACED DIVERSITY RECEPTION

Gorobtsov I.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses proposals for building a system capable of simultaneously evaluating both signals with space-time processing and spaced diversity reception as part of a single antenna array. The system compares the estimated values of the signal-to-noise ratio on the receiving antenna array and provides a solution to improve the probability of erroneous reception. A structural diagram of the proposed device is presented, as well as proposals for its technical implementation.

Key words: space-time processing, spaced diversity reception, signal strength, signal-to-noise ratio, noise immunity

УДК 004.738.43
ГРНТИ 50.43.33

ПОВЫШЕНИЕ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ ГРУППЫ БПЛА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕТИ СВЯЗИ

А. Е. Деркач, Е. В. Лиманцева, А. М. Чуднов

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Развитие сетевых технологий открывает новые возможности для беспроводных самоорганизующихся сетей, особенно на базе беспилотных летательных аппаратов. В работе основное внимание уделено улучшению управления маршрутизацией путем оптимизации сбора данных о состоянии элементов сети. Актуальность обусловлена высокой динамичностью структуры потенциальных связей сети, что увеличивает объем служебного трафика и может снижать эффективность работы группы.

Для решения проблемы, наряду с упрощением структуры сети, исследуется оптимизация сбора информации о состоянии объектов. Из-за недостатка исходных данных для классического синтеза системы мониторинга были применены технологии искусственного интеллекта для настройки параметров этого процесса. Представлены результаты, демонстрирующие эффективность предложенных процедур мониторинга на примере работы сети передачи данных группы беспилотных летательных аппаратов.

сеть передачи данных, группа БПЛА, кластеризация, искусственный интеллект, маршрутизация, адаптивное управление, вероятность своевременной доставки, вероятностно-временные характеристики, служебный трафик, таблицы маршрутизации пакетов

Введение

Эффективность работы группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) напрямую зависит от оперативности и надежности обмена данными. Из-за высокой мобильности узлов топология сети и состояние каналов связи постоянно меняются, что требует регулярного обновления информации для построения актуальных маршрутов [1, 2].

Традиционные протоколы маршрутизации решают эту задачу с помощью периодического широковещательного опроса всех узлов (например, Hello-пакетами). В крупных динамичных сетях это порождает избыточный

служебный трафик, который перегружает каналы связи, увеличивает задержки и снижает общую производительность сети [3].

Цель данной работы заключается в том, чтобы на основе ранее предложенной методики анализа ВВХ [1-4] провести сравнительную оценку эффективности классического и адаптивного подходов к мониторингу состояния кластеризованной сети БПЛА. Для этого строится модель, оценивающая влияние служебного трафика на вероятность своевременной доставки сообщений – ключевой показатель качества связи.

Модель сети и постановка задачи

Топология сети передачи данных (СПД) описывается ориентированным графом $G = (V, E)$, где V – множество узлов (БПЛА), а E – множество потенциально возможных (допустимых) направлений связи между ними. [2-4] В условиях кластеризации множество V разбивается на K непересекающихся подмножеств – кластеров:

$$V = U_{m=1}^{K} V_m$$

Матрица смежности $A = (A_{k,l})_{n \times n}$ строится по правилу:

$$A_{k,l} = \begin{cases} 1, \text{если } (k,l) \in E \\ 0, \text{иначе} \end{cases}$$

В классической схеме все n узлов опрашиваются с фиксированным периодом $T_{\text{опр}}$. Частота опроса $f = 1/T_{\text{опр}}$. Интенсивность служебного трафика от узла k к узлу l:

$$\lambda_{служ_{k,l}}^{класс} = f \cdot S_p \cdot A_{k,l}, \quad (1)$$

где S_p – среднее число служебных пакетов за один цикл опроса соседа.

В адаптивной схеме (ИИ-мониторинг). Период опроса $T_{\text{опр}}^{k}$ для узла k определяется ИИ-моделью [5]:

$$T_{опр}^{k} = F\left(S_{стаб}^{k}, S_{крит}^{k}, \Phi_{прогноз}^{k}\right). \quad (2)$$

Общая интенсивность служебного трафика сокращается пропорционально:

$$\Lambda_{служ}^{AI} = \kappa \cdot \Lambda_{служ}^{класс}, \kappa < 1. \quad (3)$$

Коэффициент редукции $\eta = 1 - \kappa$. Согласно [5], для интеллектуальных схем мониторинга $\eta \in [0{,}25; 0{,}40]$. В работе принято $\eta = 0{,}30$, $\kappa = 0{,}7$.

Исходные данные модели:

– Матрица пропускных способностей $C = (c_{k,l})$ (пакет/с), $c_{k,l} = 0$ при отсутствии связи;
– Матрица тяготения $\Lambda = (\lambda_{i,j})$ – интенсивность потока от узла i к узлу j;
– Векторы ресурсов u^*, v^* (полагаются неограничивающим фактором).

Набор таблиц маршрутизации пакетов (ТМП) для сети из n узлов:

$$\mathcal{P} = \langle P^k \rangle_{k=1}^{n}, P^k = (p_{l,j}^k), \tag{4}$$

где $p_{l,j}^k$ – вероятность того, что узел k отправит пакет для узла j через соседа l.

Задача оптимизации [3]:

$$Pr\{T \le T^*\} \to \max_{\mathcal{P}}, \tag{5}$$

где T – время задержки пакета в сети, T^* – нормативный порог своевременности.

Методика анализа и оптимизации вероятностно-временных характеристик с использованием ИИ

Предлагаемая методика состоит из трех взаимосвязанных модулей, работающих в замкнутом контуре управления:

1. Модуль адаптивного управления частотой опроса (ИИ-мониторинг).

Для каждого узла $k \in V$ формируется вектор состояния:

$$s^k = \left(S_{стаб}^k, S_{крит}^k, \Phi_{прогноз}^k, \rho_k, q_k, f_k^{тек}\right), \tag{6}$$

где $S_{\text{стаб}}^k$ – оценка стабильности каналов, $S_{\text{крит}}^k$ – показатель критичности, $\Phi_{\text{прогноз}}^k$ – прогноз связности, ρ_k – загрузка узла, q_k – длина очереди, $f_k^{\text{тек}}$ – текущая частота опроса.

Оценка стабильности каналов $S_{\text{стаб}}^k$:

$$s_{k,l}(t) = exp\left(-\frac{D_{k,l}(t)}{\sigma_0^2}\right), S_{стаб}^k = \min_{l \in \mathcal{N}(k)} s_{k,l}, \tag{7}$$

где $D_{k,l}(t)$ – дисперсия времени передачи по каналу за последний интервал наблюдения, σ_0^2 – нормировочный коэффициент.

Оценка критичности узла $S_{\text{крит}}^k$

$$S_{крит}^k = min\left(1, \alpha R_k^{стат} + (1-\alpha)\frac{\lambda_{транзит}^k}{\lambda_{\Sigma k}}\right), \alpha \in [0,1]. \tag{8}$$

Значения $R_k^{\text{стат}}$:$R_k = 1.0$ – хаб кластера; $R_k = 0.8$ – генератор видеопотока; $R_k = 0.5$ – генератор команд управления; $R_k = 0.3$ – генератор телеметрии/сенсоров.

Для каждого канала *(k, l)* на основе траекторной информации вычисляется прогнозируемое время жизни:

$$\Delta t_{k,l} = \frac{R_{max} - d_{k,l}}{|v_k - v_l|}, \quad (9)$$

где $R_{\max}$ – максимальная дальность связи, $d_{k,l}$ – текущее расстояние, v_k, v_l – скорости вдоль линии визирования.

Прогноз связности узла k – нормированное минимальное время жизни канала:

$$\Phi^k_{прогноз} = min\left(1, \frac{\min\limits_{l \in \mathcal{N}(k)} \Delta t_{k,l}}{T_{горизонт}}\right), T_{горизонт} = 5\ с. \quad (10)$$

Выход модуля – индивидуальный период опроса:

$$T^k_{опр} = F\left(S^k_{стаб}, S^k_{крит}, \Phi^k_{прогноз}, \rho_k, q_k, f_k^{тек}\right), T^k_{опр} \in [T_{min}, T_{max}], \quad (11)$$

где $T_{\min} = 0.1$ с, $T_{\max} = 2.0$ с.

Функция F реализуется нейросетевым агентом, обученным методом Proximal Policy Optimization (PPO). PPO – это алгоритм обучения с подкреплением, который помогает агентам улучшать свои действия, сохраняя стабильность обучения. [6-8]

Частота опроса узла k:

$$f_k = \frac{1}{T^k_{опр}} \quad . \quad (12)$$

Матрица служебного трафика:

$$\Lambda^{AI}_{служ} = diag(f_1, f_2, \dots, f_n) \cdot (S_p \cdot A) \quad . \quad (13)$$

Средняя частота опроса по сети не должна превышать порог, соответствующий коэффициенту редукции $\eta = 0.3$:

$$\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} f_k \le f_{avg} = 1.4\ Гц. \quad (14)$$

Данное ограничение обеспечивается штрафной функцией в процессе RL-обучения.

2. Аналитический блок полностью соответствует исходной методике [3].

Суммарная нагрузка:

$$\Lambda^{s}_{total} = \Lambda_{пол} + \Lambda^{s}_{служ} \tag{15}$$

Вычисление показателей интенсивности потоков

Для μ-маршрута $\langle i,j\rangle$-информационного направления:

$$\lambda_{\mu} = \lambda_{\langle i,j\rangle} \prod\nolimits_{(k,l)\in\mu} p^{k}_{l,j}\,. \tag{16}$$

Для *(k, l)* -направления связи:

$$\lambda_{lk} = \sum\nolimits_{\mu:(l,k)\in\mu} \lambda_{\mu} \tag{17}$$

Для k-узла (входящая нагрузка):

$$\lambda_{\Sigma k} = \textstyle\sum_{l} \lambda_{lk}\,. \tag{18}$$

Вычисление показателей задержки

Для *(k,l)* -направления связи:

$$\tau_{l,k} = \frac{1}{c_{l,k}} \quad . \tag{19}$$

Для k-узла (среднее время передачи, среднее время задержки и дисперсия):

$$\tau_{k} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma k}} \textstyle\sum_{l} \lambda_{lk}\, \tau_{l,k}, T_{k} = \frac{\tau_{k}}{1-\tau_{k}\lambda_{\Sigma k}}, D_{k} = T_{k}^{2}. \tag{20}$$

Для μ-маршрута:

$$T_{\mu} = \textstyle\sum_{k\in\mu} T_{k}\,, D_{\mu} = \sum_{k\in\mu} D_{k} \quad . \tag{21}$$

Для информационного $\langle i,j\rangle$-направления:

$$T_{\langle i,j\rangle} = \sum\nolimits_{\mu\in\langle i,j\rangle} P_{\mu|\langle i,j\rangle}\, T_{\mu}, D_{\langle i,j\rangle} = \sum\nolimits_{\mu\in\langle i,j\rangle} P_{\mu|\langle i,j\rangle}\, D_{\mu}, \tag{22}$$

где $P_{\mu|\langle i,j\rangle} = \frac{\lambda_{\mu}}{\lambda_{\langle i,j\rangle}}$.

Для СПД в целом:

$$T_{\Delta} = \sum\nolimits_{i,j} P_{\langle i,j\rangle}\, T_{\langle i,j\rangle}, D_{\Delta} = \sum\nolimits_{i,j} P_{\langle i,j\rangle}\, D_{\langle i,j\rangle}, \tag{23}$$

где $P_{\langle i,j\rangle} = \frac{\lambda_{\langle i,j\rangle}}{\sum_{p,q} \lambda_{\langle p,q\rangle}}$

Вероятность своевременной доставки (аппроксимация гамма-распределением):

$$F_{\gamma}(t) = F_G\left(t \mid T_{\gamma}, D_{\gamma}\right), \tag{24}$$

где $F_G\left(t \mid T_{\gamma}, D_{\gamma}\right)$ – функция распределения гамма-распределения с параметрами T_{γ}, D_{γ}.

Параметры формы α и масштаба β выражаются через математическое ожидание и дисперсию:

$$\alpha = \frac{T_{\gamma}^2}{D_{\gamma}}, \beta = \frac{D_{\gamma}}{T_{\gamma}} \tag{25}$$

Целевая функция задачи оптимизации ТМП – вероятность своевременной доставки пакета при предельно допустимом времени задержки T^*:

$$P_{timely} = Pr\{t \le T^*\} = F_G(T^* \mid \mathrm{T}_{\Delta}, D_{\Delta}) \tag{26}$$

3. Замкнутый контур управления (обратная связь).

Фактическая транзитная нагрузка на узел k:

$$\lambda_{\text{транзит}}^{k} = \sum_{i,j} \sum_{\mu: k \in \mu, k \notin \{i,j\}} \lambda_{\mu} \tag{27}$$

Обновленный показатель критичности:

$$S_{\text{крит}}^{k} := min\left(1, \alpha \mathrm{R}_{\mathrm{k}}^{\text{стат}} + (1-\alpha)\frac{\lambda_{\text{транзит}}^{k}}{\lambda_{\Sigma k}}\right) \tag{28}$$

Итеративный процесс продолжается до стабилизации P_{timely} и выполнения условия (14)

Пересчет периодов опроса. Обновленные значения $S_{\text{крит}}^{k}$ подаются на вход модуля адаптивного мониторинга, что приводит к коррекции $T_{\text{опр}}^{k}$ и, следовательно, $\Lambda_{\text{служ}}^{\text{AI}}$.

Результаты расчетов и сравнительный анализ

На рисунке 1 представлена топология СПД [9]: число узлов: $n = 24$, число кластеров: $K = 4$, по 6 узлов в каждом, главные узлы (хабы) – 1, 7, 13, 19.

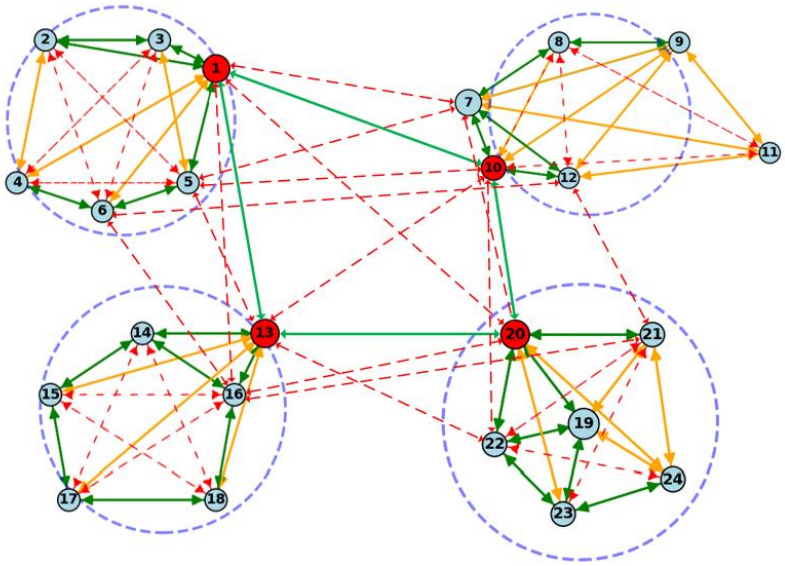


Рис. 1. Структура кластеризованнной сети передачи данных группы БПЛА

В качестве исходных данных используются:

– на рисунке 2 матрица пропускных способностей: $C = (c_{k,l})$,

где $c_{k,l}$ – потенциальная (условная, при ее использовании) пропускная способность линии связи от узла k к узлу l (в пакетах/секунду). Если прямая связь невозможна, то $c_{k,l} = 0$;

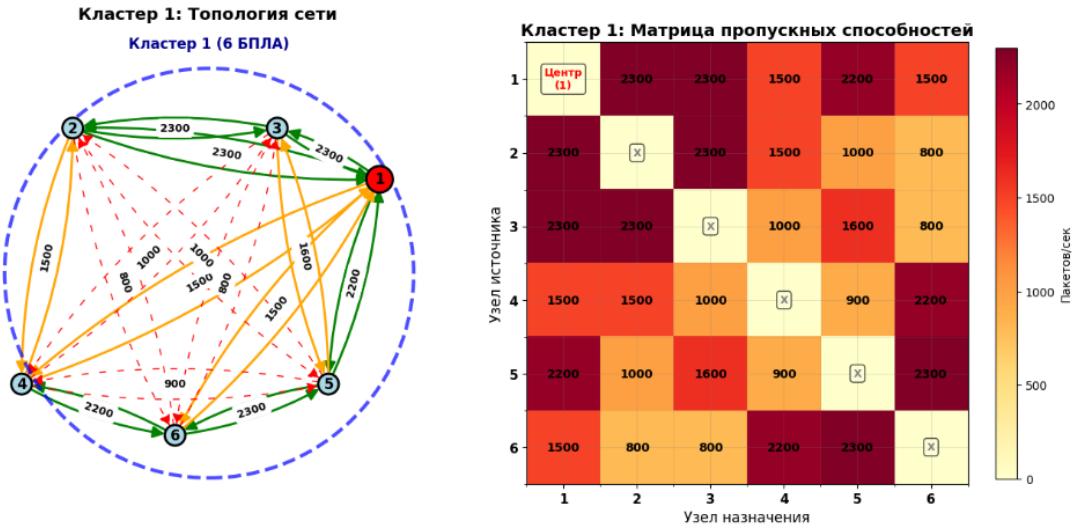


Рис. 2. Матрица пропускных способностей для кластера №1 (пример)

– на рисунке 3 матрица интенсивностей внешнего трафика в информационных направлениях СОД (матрица тяготения): $\Lambda = (\lambda_{i,j})$,

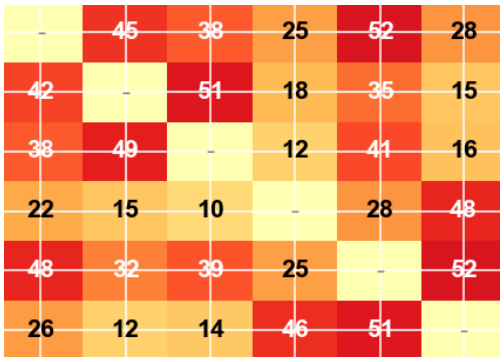


Рис. 3. Матрица тяготения для кластера №1 (пример)

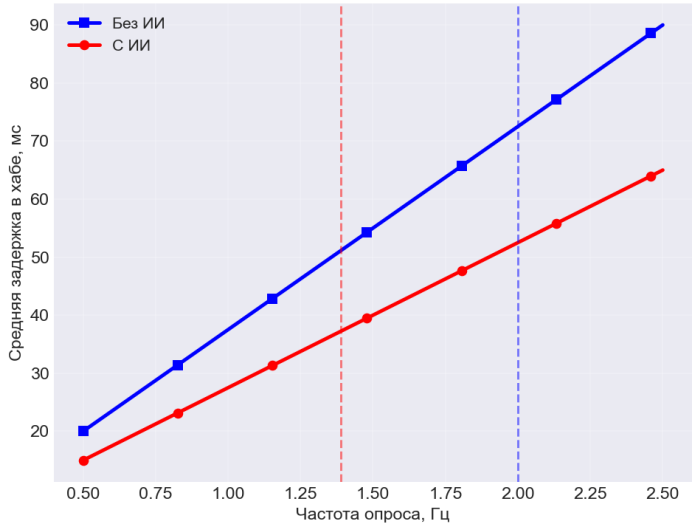


Рис. 4. Влияние частоты опроса на задержку в главном узле связи с учетом примененного ИИ и без применения ИИ

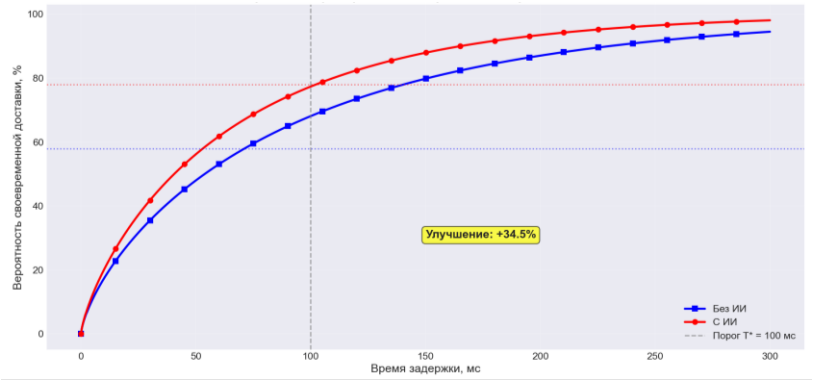


Рис. 5. Сравнение распределений времени задержки пакетов с учетом примененного ИИ и без применения ИИ

На рисунке 4 показана зависимость задержки в центральном узле от частоты опроса. Видно, что интеллектуальная система работает эффективнее.

Рисунок 5 демонстрирует главный итог нашей работы – сравнение распределений времени доставки пакетов. Применение ИИ делает его более компактным и сдвинутым влево. Это означает, что пакеты стали доставляться быстрее и стабильнее.

Заключение

Сравнительный анализ подтвердил преимущество адаптивного ИИ-управляемого мониторинга перед классическим подходом. Результаты доказывают исходную гипотезу: интеллектуальная настройка частоты служебного обмена снижает ресурсные затраты и повышает своевременность доставки сообщений в сети БПЛА. Достигнутые показатели ($\eta = 0.30$, $\Delta P_своевр = +34.5\ \%$) подтверждают практическую значимость предложенного решения.

Список используемых источников

1. Чуднов А. М., Губская О. А., Кичко Я. В. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 117–124.

2. Деркач А. Е., Чуднов А. М. Методика структурирования сети обмена данными роя беспилотных летательных аппаратов для обеспечения устойчивого их взаимодействия // Сборник лучших докладов. Том 1. V всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей (ПКМ-2024). С. 622-629.

3. Деркач А. Е., Лиманцева Е. В., Чуднов А. М. Принципы повышения устойчивости сети обмена данными большой группы БпЛА на основе кластеризации ее структуры // Телекоммуникации и связь. 2026. № 1 (10). С. 2-8.

4. Деркач А. Е., Чуднов А. М. Методика структурирования сети обмена данными роя беспилотных летательных аппаратов для обеспечения устойчивого их взаимодействия // Сборник лучших докладов. Том 1. V всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей (ПКМ-2024). С.622-629.

5. Lansky J., Ali S., Rahmani A.M., Yousefpoor M.S., Yousefpoor E., Khan F., Hosseinzadeh M. Reinforcement Learning-Based Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks (FANET): A Review // Mathematics. 2022. Vol. 10. № 17. P. 3017. DOI: https://doi.org/10.3390/math10173017

6. Khan M. F., Yau K. L. A., Ling M. H., Imran M. A., Chong Y. W. An Intelligent Cluster-Based Routing Scheme in 5G Flying Ad Hoc Networks // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. № 7. P. 3665.

7. Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013). Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. Ad Hoc Networks, 11(3), 1254-1270.

8. Qiu X. Maintaining links in the highly dynamic FANET using deep reinforcement learning / X. Qiu, Y. Yang, L. Xu, J. Yin, Z. Liao // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2023. Vol. 72, № 3. P. 2804–2818. Дата публикации: 31.03.2023. – ISSN 0018-9545.

9. Фам К. К., Глушанков Е. И., Ву Т. З. Исследование адаптивных цифровых линий радиосвязи с обратной связью // Информационные технологии и телекоммуникации // 2024. Т. 12. С. 52-67.

INCREASING THE TIMELINESS OF UAV GROUP DATA EXCHANGE BASED ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE MECHANISMS FOR MONITORING THE STATUS OF THE COMMUNICATION NETWORK

Derkach A., Limantseva E., Chudnov A.
Military Academy of Communications named after Marshal
of the Soviet Union S. M. Budyonny

The development of network technologies opens up new perspectives in the field of wireless self-organizing networks, one of the most promising areas of which are networks based on unmanned aerial vehicles. The paper focuses on improving routing management by optimizing the procedure for collecting information about the state of network facilities. The relevance of the research task is determined by the high dynamism of the structure of potential connections of the UAV network, which leads to a significant increase in the intensity of service traffic and, as a result, to a decrease in efficiency and disruption of the UAV group.

To solve the problem, along with reducing the network structure of the data exchange system, the issue of optimizing the procedure for collecting information about the state of network objects is being studied. Due to the lack of a complete set of initial data necessary for the synthesis of an optimal monitoring system in the classical sense, procedures using AI models have been tested to adjust the parameters of the process of collecting information about the state of system objects. The results describing the effectiveness of the considered monitoring procedures are obtained and presented using the example of the UAV group communication system.

Key words: data transmission network, UAV group, clustering, artificial intelligence, routing, probability of timely delivery, probabilistic and temporal characteristics, service traffic, packet routing tables

УДК 378.147.88
ГРНТИ 14.35.09

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА» В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

В. М. Деткова, Ю. В. Шарихина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена апробации в учебном процессе методических указаний для выполнения лабораторной работы «Оптико-электронные устройства», входящей в состав комплекта учебно-лабораторного оборудования «Квантовая оптика». Лабораторная установка позволяет исследовать основные параметры источников и приемников излучения. Знание принципов работы и характеристик этих ключевых элементов является фундаментальным для инженера, работающего в области фотоники и телекоммуникаций. Комплект включает три типа источников с различными физическими принципами генерации и спектральными характеристиками: полупроводниковый лазер, два светодиода, излучающих естественный свет и ИК диапазон, и приемники – фотодиод и фоторезистор. Лабораторная работа будет введена в учебный процесс в рамках дисциплин «Физика (спецглавы)», «Физика конденсированного состояния» и «Основы оптоинформатики, радиофотоники и голографии» в СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

физическое образование, квантовая оптика, учебно-лабораторное оборудование, приемник излучения

Оптоэлектроника – это раздел физики и техники, изучающий и использующий процессы преобразования электрической энергии в оптическое излучение и обратно. Знание принципов работы и характеристик ключевых элементов – источников и приемников излучения – является фундаментальным для инженера, работающего в области фотоники и телекоммуникаций.

Комплекс учебно-лабораторного оборудования «Квантовая оптика» изготовлен производственным объединением «Зарница», лидером отечественного рынка разработки и производства учебного оборудования, интерактивных тренажеров, лабораторного оборудования, робототехники [1]. В состав комплекса входят готовые комплекты оборудования с документацией, методическими рекомендациями к выполнению лабораторных работ, которые могут быть использованы при изучении различных дисциплин кафедры физики: физика (спецглавы), Волновая и квантовая оптика, Физика конденсированного состояния.

Комплект учебно-лабораторного оборудования «Оптико-электронные устройства», входящий в состав учебно-лабораторного оборудования «Квантовая оптика», предназначен для исследования характеристик фотодиода и фоторезистора.

Данная статья посвящена апробации методических указаний для выполнения лабораторной работы «Оптико-электронные устройства» в учебном процессе.

Целью работы является создание лабораторного практикума по комплекту учебно-лабораторного оборудования «Оптико-электронные устройства» и разработка методических рекомендаций для проведения лабораторной работы.

Лабораторное оборудование состоит из блока «Модуль фотоприемников», источников излучения (ИК светодиод, белый светодиод или лазер), оптической скамьи, блока «Модуль приемников излучения», блока «Узел источника излучения» и двух мультиметров (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид блока «Модуль фотоприемников», блока «Модуль приемников излучения» и двух мультиметров

Комплект включает три типа источников с различными физическими принципами генерации и спектральными характеристиками.

1. Полупроводниковый лазер. Источник когерентного, монохроматического и узконаправленного излучения. Работа основана на явлении вынужденного излучения **в** активной среде (полупроводниковом кристалле), помещенной в оптический резонатор. Основные параметры: длина волны (λ), мощность излучения, угловая расходимость пучка.

2-3. Светодиод (белый и ИК). Источник некогерентного излучения на основе спонтанной рекомбинации электронов и дырок в *p-n* переходе. Излучение имеет широкий спектр (в случае белого светодиода он формиру-

ется люминофором). Инфракрасный (ИК) светодиод излучает в невидимом диапазоне ($\lambda \approx 850$-950 нм), что важно для систем дистанционного управления и датчиков. Ключевые характеристики: светотехнические (сила света, диаграмма направленности) и электрические (вольтамперная, яркостная).

Приемники оптического излучения преобразуют оптический сигнал в электрический. В комплекте представлены два основных типа: фотодиод и фоторезистор.

1. Фотодиод. Он может работать в фотогальваническом (режим вентильного фотоэлемента без внешнего смещения) или фотодиодном (режим с внешним обратным смещением) режимах. Основной процесс – генерация носителей заряда (электрон-дырочных пар) в *p-n* переходе под действием фотонов. Характеризуется высокой быстродействием и линейностью. Важнейшая характеристика – спектральная чувствительность, показывающая зависимость фототока от длины волны падающего излучения [2, 3].

В фотодиодном режиме фотодиод, как и фоторезистор, используют для управления электрическим током в цепи в соответствии с изменением интенсивности падающего излучения.

Свойства фотодиода характеризуют вольтамперной характеристикой. Она представляет собой зависимость обратного тока от напряжения при неизменном световом потоке. Вольтамперные характеристики фотодиода приведены на рис. 2.

Если светового потока нет (Ф = 0), то через фотодиод протекает обычный обратный ток (*темновой* ток I_0). Под действием светового потока (Ф1, Ф2, Ф3 и т.д.) обратный ток в диоде возрастает, и характеристика располагается ниже. Чем больше световой поток, тем больше обратный ток. Таким образом, световой поток управляет *обратным током* фотодиода.

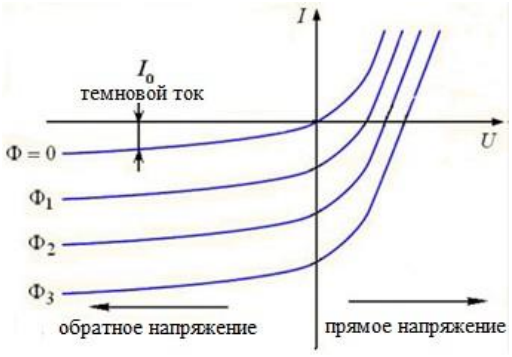


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика фотодиода

Фотодиод, изготовленный из определенного материала, способен реагировать на свет с длиной волны, лежащей только в определенном диапазоне. Это свойство фотодиодов называют селективностью.

2. Фоторезистор (фотосопротивление). Принцип действия основан на внутреннем фотоэффекте **в** полупроводнике. Поглощение фотонов увеличивает концентрацию свободных носителей заряда, что приводит к снижению электрического сопротивления материала. Характеризуется высокой интегральной чувствительностью, но меньшим быстродействием по сравнению с фотодиодом.

Для фоторезисторов характерны стабильность фотоэлектрических характеристик во времени, простота устройства, допускающая различные конструктивно-технологические решения, невысокая стоимость, высокие фотоэлектрические свойства, малые габариты. Фоторезисторы выгодно отличаются от фотодиодов почти линейной вольтамперной характеристикой, что важно при точных измерениях и отсутствием паразитных гармоник при переменных сигналах [2, 3].

Зависимость силы тока от светового потока показана на графике (рис. °3).

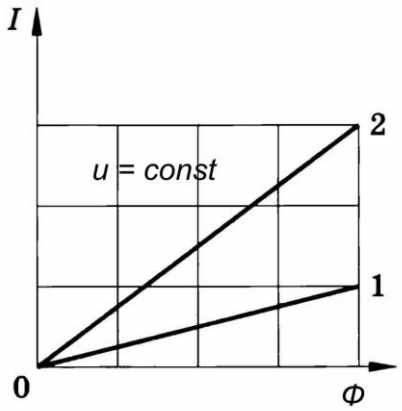


Рис. 3. Зависимость силы тока от светового потока фоторезистора

Образованию электронов способствует как видимый спектр света, так и невидимый. Причем фоторезистор более чувствителен к инфракрасным лучам, имеющим большую энергию. Низкую чувствительность к видимому свету проявляют чистые материалы.

Преимуществами фоторезисторов оказывается их высокая надежность и низкая цена, а также низкий порог чувствительности.

Для определения и изучения параметров и характеристик фоторезисторов и фотодиодов необходимо построить вольтамперную характеристику прибора, график зависимости тока от освещенности, определить значение теневого тока, теневого сопротивления. В предлагаемой установке все не-

обходимые измерения проводят с помощью двух прилагаемых мультиметров.

Для получения данных на оптическую скамью устанавливают подвижные рейтеры с блоками «Модуль фотоприемников», источник излучения (ИК светодиод, белый светодиод или лазер). Блок «Модуль фотоприемников» с блоком «Модуль приемников излучения» соединяют с блоками «Модуль приемников излучения» и «Узел источника излучения». Мультиметры подключают к блоку «Модуль приемников излучения» для измерения необходимых параметров (рис. 1).

Снимают вольтамперные характеристики (ВАХ) фотодиода и фоторезистора при различных уровнях освещенности. Перемещая каретку блока «Модуль фотоприемников» по горизонтали устанавливают исследуемый элемент над отметкой «0» мерной шкалы (рис. °4). Слева на плате расположен фотодиод, справа – фоторезистор.

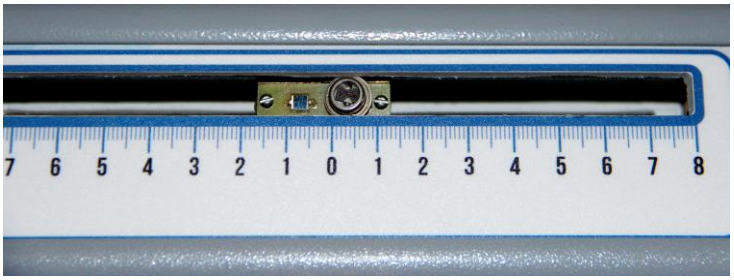


Рис. 4. Блок «Модуль фотоприемников»

Интенсивность излучения каждого источника можно изменять, увеличивая или уменьшая расстояние от источника света до приемника, либо регулируя напряжение на источнике соответствующим потенциометром. Особое внимание следует обратить на начальную величину силы тока, необходимой для корректной работы лазера. Она должна быть не менее порогового значения.

Использование источников с разной длиной волны (лазер, ИК-светодиод) позволяет определить величину спектральной чувствительности фотоприемников. Исследовать угловые характеристики приемников излучения можно с помощью блока «Модуль фотоприемников», поворачивая его вокруг вертикальной оси.

Исследование характеристик реальных источников и приемников излучения повышает интерес у студентов к обучению, позволяет на практике рассчитать основные параметры этих устройств.

Список используемых источников

1. Производственное общединение «Зарница». Официальный сайт. URL: https://zarnitza.ru/ (дата обращения 10.12.2025).
2. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 288 с.
3. Фридрихов С. А., Мовкин С. М. Физические основы электронной техники. М.: Высшая школа, 1982, 608 с.

TESTING GUIDELINES FOR CARRYING OUT THE LABORATORY WORK «OPTICAL-ELECTRONIC DEVICES» IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Detkova V., Sharihina Yu.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article explores the educational testing of guidelines for the «Optoelectronic Devices» lab, part of the «Quantum Optics» educational laboratory equipment set. This lab setup allows for the study of the key parameters of radiation sources and receivers. Understanding the operating principles and characteristics of these key components is fundamental for engineers working in photonics and telecommunications. The kit includes three types of sources with different generation principles and spectral characteristics: a semiconductor laser, two LEDs emitting natural light and infrared wavelengths, and receivers–a photodiode and a photoresistor. This lab will be integrated into the curriculum of the courses «Physics (Special Chapters)» «Condensed Matter Physics» and «Fundamentals of Optoinformatics, Radiophotonics, and Holography» at the M. A. Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications.

Key words: physics education, quantum optics, educational laboratory equipment, radiation receiver

УДК 621.382
ГРНТИ 29.19.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MATHCAD В РАМКАХ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

В. М. Деткова, Ю. В. Шарихина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Моделирование и расчеты структурных, электронных, оптических и магнитных свойств наноструктур, а также элементов и приборов наноэлектроники на их основе представляют большой интерес для современной промышленности. Движение квантово-механических частиц через потенциальный барьер (ПБ) является одним из базовых физических явлений квантовой механики. Примерами такого движения являются прохождение электронов через границу раздела двух полупроводников с разными типами электропроводности, а также проникновение микрочастиц сквозь тонкие пленки. Низкоразмерные структуры – квантовые ямы, квантовые шнуры и квантовые точки, также являются актуальными объектами исследования. В работе приведены численные расчеты и рассмотрены особенности построения графиков с помощью программы Mathcad для различных вариантов прохождения частицы через потенциальный барьер.

наноэлектроника, потенциальный барьер, Mathcad.

Программное обеспечение (ПО) Mathcad позволяет контролировать размерность физических величин, используемых в расчетах с помощью встроенной в программную среду системы единиц измерения (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Встроенная в программную среду Mathcad система единиц измерения на примере физических величин, используемых в данной работе

Наименование физической величины	Обозначение единиц измерения в СИ	Обозначение единиц измерения в ПО Mathcad
масса	килограмм (кг)	kg
энергия	Джоуль (Дж)	J
время	Секунда (с)	s
заряд	Кулон (Кл)	C
напряжение	Вольт (В)	V

В квантовой физике и наноэлектронике значения энергии часто приводят в электрон-вольтах (эВ). Для проведения квантово-механических расчетов нужно перевести эти значения в СИ, но эВ нет во встроенной библиотеке единиц измерения величин ПО Mathcad (рис. 1). В связи с этим для корректного выполнения численных расчетов необходимо вручную перевести эВ в Дж, умножив значение энергии в эВ на заряд электрона.

$me := 9.1 \cdot 10^{-31}\,kg$ - масса электрона

$h := 6.62 \cdot 10^{-34}\,J \cdot s$ - постоянная Планка

$q := 1.6 \cdot 10^{-19}\,C$ - единичный заряд

$E := 10 \cdot q \cdot V = 1.6 \times 10^{-18}\,J$ - энергия электрона

$A := 1$ - амплитуда волновой функции

$hp := \frac{h}{2 \cdot \pi} = 1.054 \cdot J \cdot s \cdot 10^{-34}$ - приведенная постоянная Планка

Рис. 1. Пример ввода исходных данных в среде Mathcad

Рассмотрим движение свободной частицы вдоль оси x. Плотность вероятности нахождения частицы в определенном месте пространства с координатой x – это квадрат модуля волновой функции [1-2]. Запишем это выражение в виде $(Re(\psi(x_1,t)))^2$. Для построения зависимости квадрата действительной части волновой функции частицы от координаты x необходимо определить численные значения величин, используемых в формуле для нахождения волновой функции (рис. 2-3).

$w := \frac{E}{hp} = 1.519 \times 10^{16} \cdot Hz$ - циклическая частота

$p := \sqrt{2 \cdot me \cdot E} = 1.706 \frac{m \cdot kg}{s} \cdot 10^{-24}$ - импульс электрона

$k := \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{h} = 1.62 \times 10^{10} \frac{1}{m}$ - волновое число

Рис. 1. Пример расчета значений циклической частоты ω, импульса p и волнового числа k электрона в среде Mathcad

$t1 := 10^{-17}\,s \qquad t2 := 10^{-16}\,s$

$\Psi(x1, t) := A \cdot e^{i \cdot (k \cdot x1 - w \cdot t)}$

Рис. 3. Задание значений времени и выражения для нахождения волновой функции в ПО Mathcad

Построим графики зависимости плотности вероятности нахождения частицы в определенном месте пространства от координаты x при двух заданных значениях времени t_1 и t_2 (рис. 4) [3].

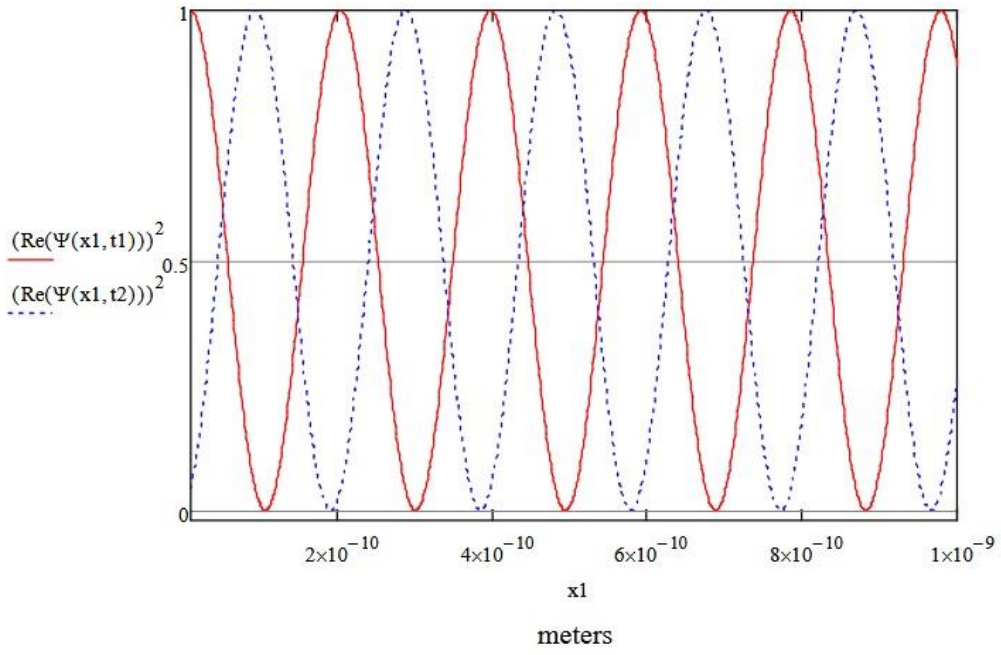


Рис. 4. Графики зависимости квадрата действительной части волновой функции частицы от координаты x при двух заданных значениях времени

Рассмотрим моделирование движения микрочастицы в поле потенциальных сил. Пусть электрон, обладающий энергией $E = 0{,}9$ эВ, движется по направлению к ПБ высотой $U_0 = 1$ эВ вдоль оси x (рис. 5).

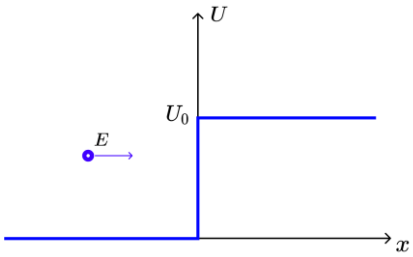


Рис. 5. Движение частицы через ПБ

Запишем исходные данные (рис. 6).

$me := 9.1 \cdot 10^{-31}\,kg$

$U0 := 1C \cdot V$

$E := 0.9C \cdot V$

$h := 6.63 \cdot 10^{-34}\,J \cdot s$

$$hp := \frac{h}{2 \cdot \pi} = 1.0552 \cdot J \cdot s \cdot 10^{-34}$$

Рис. 6. Запись исходных данных в ПО Mathcad

Функцию, описывающую потенциальный барьер, представим в среде Mathcad в виде (рис. 7):

$$U(x) := \begin{cases} U0 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Рис. 7. Запись функции потенциального барьера в ПО Mathcad

Запишем в область ввода среды Mathcad формулы для нахождения волновых чисел k_1 и k_2 (рис. 8):

$$k1 := \sqrt{\frac{2 \cdot me}{hp^2} \cdot E} = 1.2129 \times 10^{19}\,\frac{1}{m}$$

$$k2(x) := \sqrt{\frac{2 \cdot me}{hp^2} \cdot (E - U(x))}$$

Рис. 8. Запись формул для нахождения волновых чисел k_1 и k_2 в ПО Mathcad

При $x < 0$ волновое число определяется выражением для свободного движения частицы. В области ПБ ($x \geq 0$) потенциальная энергия задается функцией $U(x)$, а волновое число k_2 является функцией координаты.

Запишем волновые функции электрона вне ПБ и внутри него (рис. 9):

$$\psi 1(x) := A1 \cdot e^{i \cdot k2(x) \cdot x} + B1(x) \cdot e^{-i \cdot k1 \cdot x}$$

$$\psi 2(x) := A2(x) \cdot e^{i \cdot k2(x) \cdot x} + B2 \cdot e^{-i \cdot k2(x) \cdot x}$$

Рис. 9. Запись выражений для волновых функций электрона вне потенциального барьера и в области ПБ в ПО Mathcad

Объединим волновые функции электрона вне ПБ $\psi_1(x)$ и внутри него $\psi_2(x)$ в полную волновую функцию электрона $\psi(x)$ (рис. 10).

$$\Psi(x) := \begin{cases} \psi 1(x) & \text{if } x < 0 \\ \psi 2(x) & \text{if } x \geq 0 \end{cases}$$

Рис. 10. Запись полной волновой функции электрона в ПО Mathcad

Построим график зависимости плотности вероятности нахождения частицы в определенном месте пространства от координаты x в заданный момент времени (рис. 11).

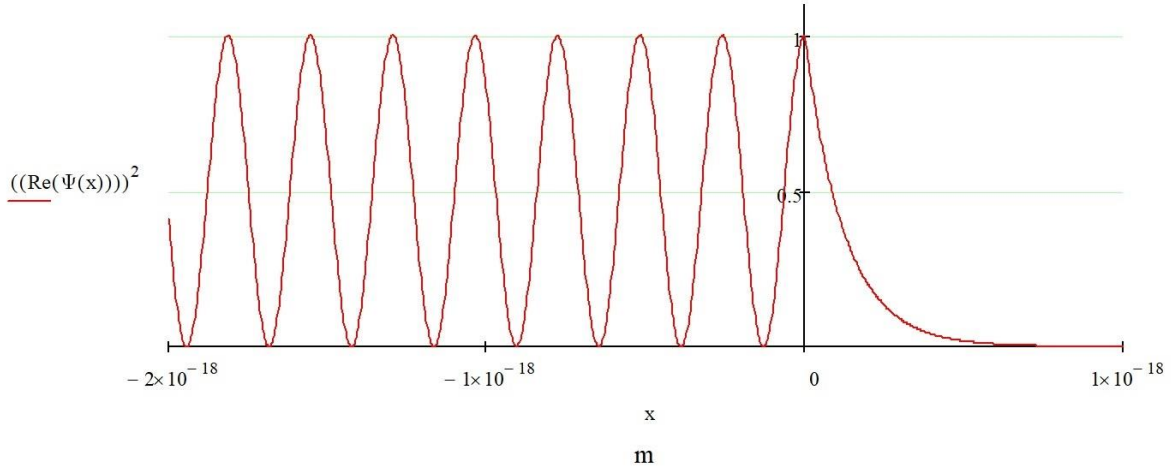


Рис. 11. График зависимости квадрата действительной части волновой функции электрона от координаты x в заданный момент времени

Запишем в среде Mathcad формулы для нахождения волнового числа k_2, $R(U_1)$ и $D(U_1)$ (рис. 12):

$$k2(U1) := \sqrt{\frac{2 \cdot me}{hp^2} \cdot (E - U1)} \qquad R(U1) := \frac{(k1 - k2(U1))^2}{(k1 + k2(U1))^2} \qquad D(U1) := \frac{4 \cdot k1 \cdot k2(U1)}{(k1 + k2(U1))^2}$$

Рис. 12. Запись формул для нахождения волнового числа k_2 , $R(U_1)$ и $D(U_1)$ в ПО Mathcad

Построим для рассматриваемой частицы графики зависимости коэффициентов отражения R и прозрачности D от высоты потенциального барьера (рис. 13).

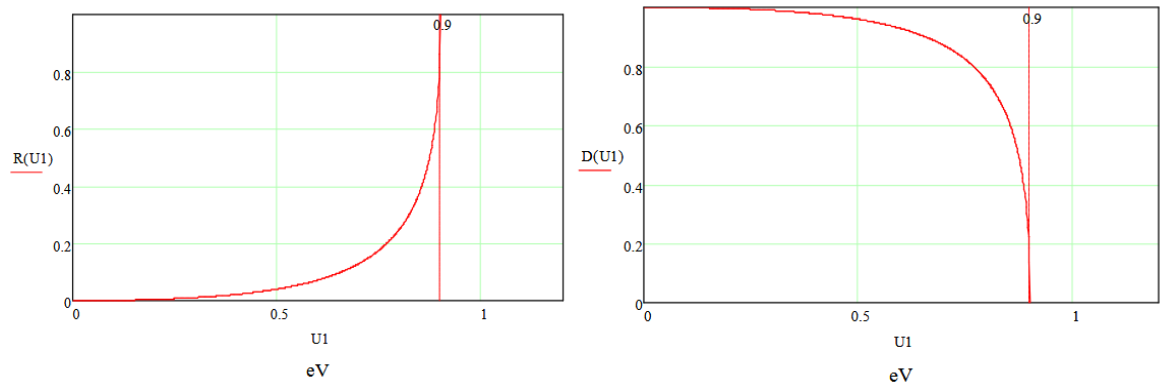


Рис. 13. График зависимости коэффициента отражения R и коэффициента прозрачности D от высоты ПБ U_1

Анализ графиков показывает, что с увеличением высоты ПБ коэффициент отражения R возрастает, а коэффициент прозрачности D уменьшается, что соответствует квантово-механическим представлениям о прохождении частицы через барьер.

Список используемых источников

1.ºЩука А. А. Наноэлектроника: учеб. пособие для вузов / А. А. Щука. М.: Физматкнига, 2007. 464 с.

2.ºБорисенко В. Е. Наноэлектроника: теория и практика: учебник / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, А. Л. Данилюк, Е. А. Уткина. 7-е изд. Москва: Лаборатория знаний, 2025. 369 с.

3.ºКомпьютерное моделирование физических процессов в микро- и наноэлектронике: лабораторный практикум / сост.: Д. А. Евсевичев, М. К. Самохвалов. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 63 с. URL: http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2017/267.pdf (дата обращения 10.12.2025).

MODELING THE PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES USING MATHCAD AS PART OF THE NANOELECTRONICS COURSE

Detkova V., Sharikhina Yu.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Modeling and calculating the structural, electronic, optical, and magnetic properties of nanostructures, as well as nanoelectronic components and devices based on them, are of great interest to modern industry. The motion of quantum-mechanical particles through a potential barrier is one of the fundamental physical phenomena of quantum mechanics. Examples of such motion include the passage of electrons through the interface between two semiconductors with different types of electrical conductivity, as well as the penetration of microparticles through thin films. Low-dimensional structures such as quantum wells, quantum wires, and quantum dots are also relevant objects of research. The paper presents numerical calculations and examines the features of constructing graphs using the Mathcad program for various options for the passage of a particle through a potential barrier.

Key words: nanoelectronics, potential barrier, Mathcad

УДК 621.373.52
ГРНТИ 47.14.17

АНАЛИЗ КЛЮЧЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ МОДУЛЯЦИОННОГО ТИПА С УЧЕТОМ ФИЛЬТРА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

В. Ф. Дмитриков, З. В. Зайцева, П. С. Мельников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Авторами показано, что нестационарные динамические замкнутые системы, электромагнитные процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями с периодически изменяющимися коэффициентами, можно свести к линейным стационарным, используя разработанный советским академиком профессором С. Л. Чечуриным метод гармонической линеаризации для стационаризации линейных, но не стационарных систем. Такой системой является ключевой усилитель мощности. Определен режим работы ключевого усилителя мощности, который принципиально отличается от классов D, F и $F_{инв}$. В найденном режиме к нагрузочному контуру и транзисторам прикладывается не знакопеременное прямоугольное, а квазисинусоидальное напряжение, обеспечивающее ряд принципиальных преимуществ.

усилитель мощности, гармоническая линеаризация, нестационарные системы, замкнутые системы

В радиотехнических и преобразовательных системах используются устройства энергетически высокоэффективные (с КПД 90-97 %) для преобразования электрической энергии и усиления информационных сигналов, т.е. усилители мощности (УМ), работающие в ключевом (импульсном) режиме (рис. 1). В ключевых усилителях мощности класса D к нагрузочному контуру прикладывается знакопеременное прямоугольное напряжение и через него протекает такой же по форме ток (рис. 2а). В преобразователях класса F к нагрузочному контуру прикладывается прямоугольное напряжение, а через нагрузочный контур протекает синусоидальный ток [1].

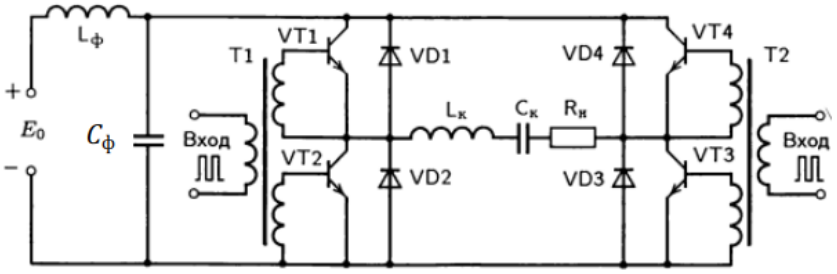
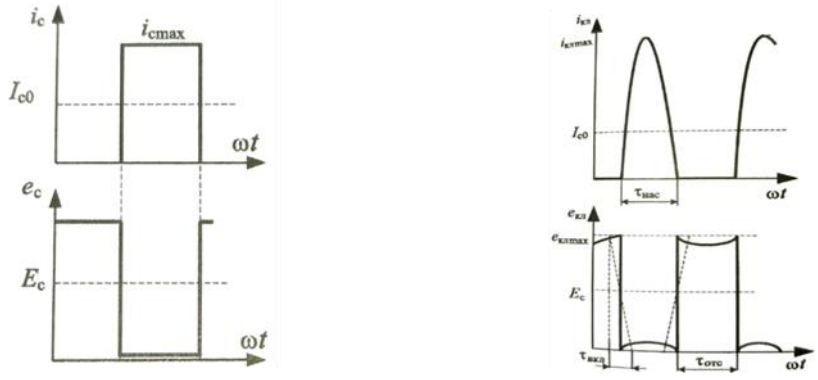


Рис. 1. Ключевой усилитель мощности (УМ) с последовательным резонансным контуром нагрузки

Такие системы, как УМ класса F, изначально называли инверторами напряжения. При определенных соотношениях параметров в контуре нагрузке и фильтре источника питания УМ может наблюдаться режим работы с особыми свойствами. Было установлено, что при уменьшении емкости конденсатора фильтра источника питания, при его соразмерности по значению с емкостью конденсатора контура нагрузки к нагрузочному контуру и транзисторам прикладывается не прямоугольное знакопеременное напряжение, а близкое к синусоидальному, с уменьшенным коэффициентом гармоник. Этот режим работы устраняет недостатки, присущие УМ классов D и F: коммутационные потери, пониженная электромагнитная совместимость из-за большого количества высокочастотных гармоник в спектральном составе выходного напряжения и т.д.



а) б)

Рис. 2. Временные зависимости токов и напряжений, прикладываемых к транзисторам в УМ: а) класса D; б) класса F

Для анализа процессов в системе, рассматриваемого УМ с учетом цепей постоянного и переменного тока, т.е. с учетом взаимодействия фильтра источника питания и нагрузки, составляются уравнения, описывающие процессы в УМ, на основе которых составляется структурная схема системы. Построение структурной схемы позволяет облегчить процесс исследования для установления влияния частей системы друг на друга, а также позволяет применять структурные преобразования, облегчающие и обобщающие анализ без решения интегродифференциальных уравнений.

В ключевом УМ, выполненном в соответствии с топологией, представленной на рисунке 1, переключение транзисторов происходит в соответствии с коммутационной функцией a(t), изображенной на рисунке 3.

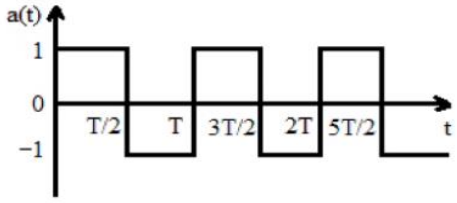


Рис. 3. Функция $a(t)$

При этом к суммарной нагрузке УМ прикладывается напряжение:

$$U_{\text{н}}(t) = a(t)U_A(t), \tag{1}$$

где $a(t) = \text{sign}\sin\omega t -$ коммутирующая функция (рис. 3), $U_A(t) -$ напряжение на конденсаторе фильтра выпрямителя, В.

Ток нагрузки можно записать в виде:

$$i_{\text{н}}(t) = Y_{\text{вх}}(p)U_{\text{н}}(t), \tag{2}$$

где $Y_{\text{вх}}(p) -$ операторная форма записи проводимости нагрузки, $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Ток нагрузки:

$$i_{\text{н}}(t) = a(t)i_{\text{А}}(t). \tag{3}$$

Поскольку $a^2 = 1$, то из уравнения выше следует, что $i_A(t) = a(t)i_{\text{н}}(t)$. Воспользовавшись методом суперпозиции, запишем выражение для напряжения на конденсаторе фильтра выпрямителя $U_A(t)$ в операторном виде:

$$U_A(t) = K_{\text{ф}}(p)E - Z_{\text{ф}}(p)i_A(t), \tag{4}$$

где $K_{\text{ф}}(p) -$ коэффициент передача со входа на выход фильтра при отключенном генераторе, т.е. при $i_{\text{А}}(t) = 0$, $Z_{\text{ф}}(p) -$ операторное сопротивление фильтра выпрямителя со стороны выхода при коротком замыкании на его входе.

Для рассматриваемого на рис. 1 $L_{\text{ф}}C_{\text{ф}}$-фильтра.

$$\begin{aligned} Z_{\text{ф}} &= \frac{pL_{\text{ф}}}{1 + p^2L_{\text{ф}}C_{\text{ф}}} \\ K_{\text{ф}}(p) &= \frac{1}{1 + p^2L_{\text{ф}}C_{\text{ф}}} \end{aligned} \tag{5}$$

На основе полученных выражений можно составить структурную схему (рис. 4), отражающую процессы в УМ. Наличие внутренней обратной

связи обозначает, что система является замкнутой, а звенья коммутационной функции – что она нестационарна.

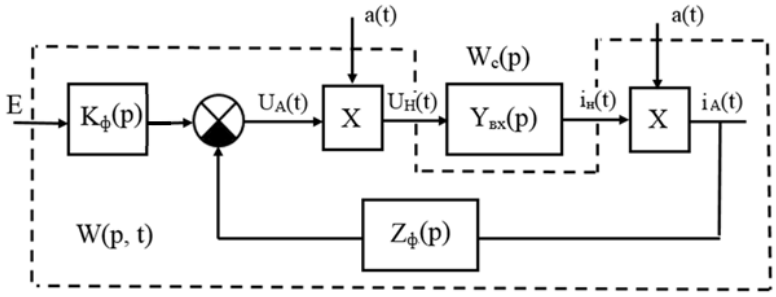


Рис. 4. Замкнутая структурная схема ключевого УМ

Для решения подобного рода схем существует несколько методов. Методы анализа периодически нестационарных систем, позволяющие строить высшие приближения существуют [2-6], однако их громоздкость и трудность вычисления указывают на их непрактичность. По этой причине актуальной задачей становится применение приближенных методов.

Метод гармонической линеаризации предполагается применять для стационарных, но не линейных систем. Впервые метод гармонической линеаризации к классу систем автоматического управления с периодически изменяющимися параметрами был применен в [7]. Основная идея заключается в выделении стационарной и нестационарной частей системы и замене на «эквивалентный» по основной гармонике блок или параметр с постоянными коэффициентами нестационарной части. Под основной гармоникой подразумевается частота коммутации в системе рассматриваемого УМ.

Рассмотрим анализ процессов и рассчитаем основные характеристики УМ при выполнении условий: $\Delta(t) \ll I_m$. – высшие гармоники много меньше основной; $I_н(t) \approx I_m \cos(\omega t - \varphi)$ – можно пренебречь значениями высших гармоник для определения выходного сигнала. В соответствии со структурной схемой на рис. 4:

$$i_a(t) = a(t) i_н(t) = I_m a(t)\, cos(\omega t - \varphi), \qquad (6)$$

где I_m и φ являются неизвестными величинами, которые необходимо определить данным расчетом, $a(t)$ – коммутационная функция $\operatorname{sign}\sin \omega t$.

В результате преобразований находится коэффициент гармонической линеаризации, который имеет вид:

$$W(j\omega) = 1 - \frac{8}{\pi^2} - \frac{4EK(j\omega)}{Z_ф(2j\omega)\pi} e^{j\varphi},$$

а дифференциальное уравнение, описывающее систему:

$$\dot{U}_{1н} = -\dot{I}_{1н} Z_ф(2j\omega) W(j\omega).$$

В соответствии со структурной схемой (Рис. 4) составим уравнение гармонического баланса:

$$\dot{U}_{1н} Y_н(j\omega) = \dot{I}_{1н} \quad (7)$$

Подставляя в равенство (7) значение $\dot{U}_{1н}$ из (30), получаем уравнение, из которого определяются неизвестные φ и I_m:

$$W(j\omega) = -V(j\omega), \quad (8)$$

где $V(j\omega) = -\frac{Z_н}{Z_ф}$.

Решая уравнение гармонического баланса графическим методом, можно получить:

$$I_m = \frac{4EK(j\omega)}{Z_ф(2j\omega)} \left(\frac{1}{\pi \left| V(j\omega) - 1 + \frac{8}{\pi^2} \right|} \right) \quad (9)$$

$$\varphi = arccos\left(-\frac{ReV(j\omega) - 1 + \frac{8}{\pi^2}}{\left| V(j\omega) - 1 + \frac{8}{\pi^2} \right|} \right) \quad (10)$$

Для определения таких характеристик УМ, как максимальное и среднее значения токов, протекающих через транзисторы, максимальное напряжение на транзисторах удобно использовать выражения для токов и напряжений в замкнутой форме, а не в виде рядов. Это можно сделать, воспользовавшись методом интегральных уравнений, описанного в [8]. Таким образом, для напряжения на конденсаторе фильтра (и на транзисторах) получим:

$$u_a(t) = EK(j\omega) + I_m Z_ф(j\omega) \left[\frac{2\psi}{\pi} sin\,\varphi - sin(\psi - \varphi) - \sin\varphi + \frac{2}{\pi} cos\,\varphi \right] \quad (11)$$

В зависимости от значения φ можно выделить три области (рис. 5):

$$\varphi \in \left[0, arctg\frac{\pi}{2}\right];\ \varphi \in \left[0, arctg\frac{\pi}{2}, \pi - arctg\frac{\pi}{2}\right]; \varphi \in \left[\pi - arctg\frac{\pi}{2}, \pi\right]$$

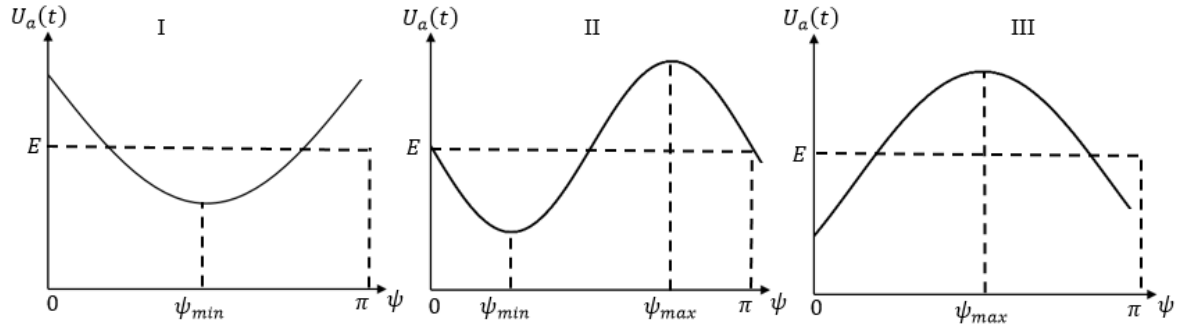


Рисунок 5. Возможные формы напряжения $U_a(t)$

Третья область является очевидно предпочтительной для режима работы УМ, так как переключение транзисторов будет происходить при напряжении ниже напряжения питания (вплоть до близких к нулю значений), что и позволит добиться нового режим работы, при котором будут достигаться следующие преимущества:

– уменьшенные динамические потери за счет того, что транзисторы переключаются при близком к нулю напряжении;
– на порядки уменьшенные коэффициент гармоник, а, следовательно, уменьшить массогабаритные характеристики фильтрующих систем;
– уменьшенная в десятки раз скорость нарастания напряжения, прикладываемого к транзисторам, что позволит устранить эффект Миллера;
– уменьшенные в десятки раз номиналы значений емкости конденсаторов и индуктивностей дросселей в фильтрах источников питания позволяют уменьшить массогабаритные характеристики УМ в целом.

Список используемых источников

1. Дигенс С. И., Иванюшкин Р. Ю., Козырев В. Б. и др. Радиопередающие устройства. Учебник для вузов. Под общей редакцией Иванюшкина Р. Ю. М.: Горячая линия Телеком, 2023. 1200 с.

2. Андронов А. А., Леонтович М. А. О колебаниях системы с периодически меняющимися параметрами: Собр. тр. А. А. Андронова. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 538 с.

3. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974. 503 с.

4. Солодов А. В., Петров Ф. С. Линейные автоматические системы с переменными параметрами. М.: Наука, 1971. 620 с.

5. Солодовников В. В., Бородин Ю. М., Иоаннисян А. В. Частотные методы анализа и синтеза нестационарных линейных систем. М.: Сов. радио, 1972. 168 с.

6. Мерабишвили С. Ф. Операторный метод расчета переходных процессов в однофазных автономных инверторах // Электричество. 1970. № 5. С. 52-56.

7. Чечурин С. Л. Параметрические колебания и устойчивость периодического движения. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 220 с.

8. Розенвассер Е. Н. Периодически нестационарные системы управления. М.: Наука, 1973. 512 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры Э СПбГУТ, доктором технических наук, профессором В. Ф. Дмитриковым.

THE ANALYSES OF SWITCHING SINE VOLTAGE POWER AMPLIFIER WITH THE TAKING INTO ACCOUNT PARAMETERS OF POWER SUPPLY FILTER

Dmitrikov V., Zaitseva Z., Melnikov P.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article shows the unstationary dynamic systems of switching sine voltage generators have inner feedback loop which makes them closed-loop systems. The method of stationarization was used to analyze the processes conducted in the system. The unique operating mode was found during the research in which the flaws of class-D and F power amplifier were eliminated.

Key words: power amplifier, harmonic linearization, unstationary systems, closed-loop systems

УДК 621.373.52
ГРНТИ 47.14.17

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ В «МАЛОМ» ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ЗАМКНУТЫМИ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ СИСТЕМАМИ С ВНУТРЕННЕЙ ООС

В. Ф. Дмитриков, З. В. Зайцева, П. С. Мельников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

С использованием метода «стационаризации» ключевой генератор гармонических колебаний сводится к линейной стационарной структуре с постоянными параметрами, процессы в которой описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Проведенные исследования показали, что при пассивной нагрузке система устойчива. Однако, при активной нагрузке или нагрузке с падающей входной характеристикой система может возбуждаться.

импульсный преобразователь напряжения, устойчивость нестационарной системы, внутренняя обратная связь, устойчивость в «малом»

Стабилизированные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с отрицательной обратной связью относятся к классу импульсных дискретно-нелинейных динамических систем, электромагнитные процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями с наличием разрывных функций в правой части. Основной проблемой является возникновение в их функционировании периодических, субгармонических и хаотических режимов, которые могут приводить к выходу из строя или, по крайней мере, уменьшению срока служба системы [1].

Различные исследователи указывают на отсутствие методики получения полной картины динамической устойчивости системы. Если аппарат изучения локальной устойчивости по М. А. Ляпунову, т.е. устойчивости в «малом» достаточно отработан и, как правило, сводится к линеаризации системы и использованию алгебраических или частотных критериев устойчивости линейных систем, то критерий устойчивости системы в «целом», несмотря на отдельные исследования в этом направлении на сегодняшний день не существует.

Недостатки использования метода локальной устойчивости замкнутых импульсно-модуляционных систем, сводящегося в конечном итоге к их линеаризации различными способами, заключается в проблеме достоверности получаемых результатов исследований.

Простейшим методом изучения нелинейных систем является линеаризация, а нестационарных систем – стационаризация. Суть ее состоит в том, что нелинейная система заменяется эквивалентной линейной, а линейная нестационарная с переменными параметрами, электромагнитные процессы в которой описываются дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, заменяется эквивалентной стационарной линейной системой с постоянными параметрами, электромагнитные процессы в которой описываются обыкновенными дифференциальным уравнениями с постоянными коэффициентами. При исследовании устойчивости систем в «малом» в технических науках описывается линеаризация, когда сигнал отклоняется от рабочей точки настолько мало, что нелинейные характеристики в районе рабочей точки заменяются с большой точностью эквивалентными линейными. Следует подчеркнуть, что успех линеаризации вблизи рабочей точки нелинейного элемента зависит от того достаточно ли малы на самом деле колебания в конкретной нелинейной системе, чтобы замена ее линейной моделью в диапазоне максимальной амплитуды колебания сигнала была допустимой. Наконец, нужно оценить ошибку, вызванную линеаризацией.

Анализ импульсных преобразователей напряжения (ИПН), рассматриваемых в статье, включает следующие этапы: составление математических моделей ИПН, представление их в виде структурных схем, преобразование структурных схем с использованием графов и алгебры передаточных функций к обобщенной схеме, а также разработку эквивалентного метода анализа и исследование его погрешности. Построение структурной схемы позволяет облегчить процесс исследования для установления влияния частей системы друг на друга, а также позволяет применять структурные преобразования, облегчающие и обобщающие анализ без решения интегродифференциальных уравнений.

Для анализа ИПН (рис. 1) широко используемого в различных областях техники (радиотехники, радионавигации, гидроакустики, различных системах управления техническими средствами, различных системах электропитания) с учетом параметров цепей постоянного и переменного токов (фильтра источников питания и нагрузки), запишем основные соотношения, описывающие процессы в схеме ИПН, и составим их структурные схемы.

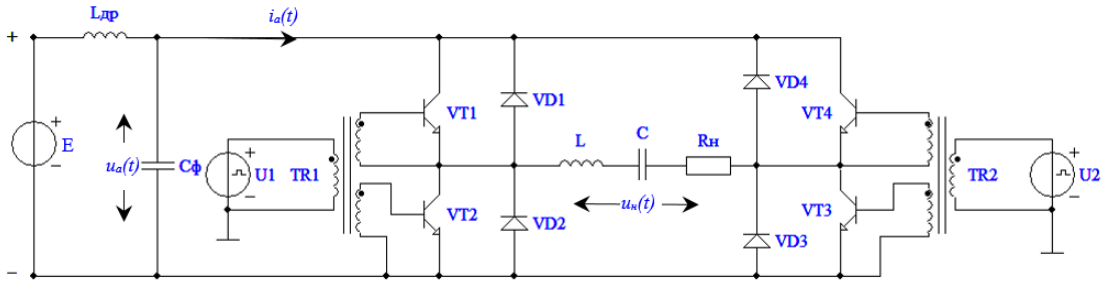


Рис. 1. Схема импульсного преобразователя с открытым входом

$$I_н\,(t)\;=\;Y_{ВХ}(p)\;\cdot\;U_н(t), \tag{1}$$

$$U_н(t)\;=\;a(t)\;\cdot\;U_а(t) \tag{2}$$

$$I_н(t)=\;a(t)\;\cdot\;l_а(t) \tag{3}$$

$$U_a(t)=\;K_ф(p)E\;-\;Z_ф(p)I_a(t) \tag{4}$$

Для рассматриваемого на рис. 1 $L_ф C_ф$-фильтра

$$Z_ф(p)=\frac{pL_ф}{1+p^2L_ф C_ф}$$
$$K_ф(p)=\frac{1}{1+p^2L_ф C_ф} \tag{5}$$

Использовав зависимости (1)-(4) составим структурную схему (рис. 2), отражающую процессы в импульсном преобразователе.

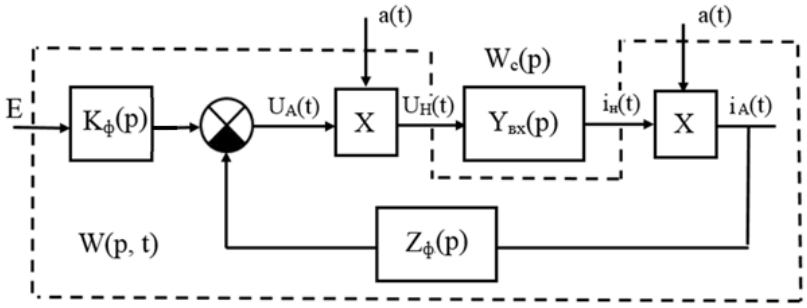


Рис. 2. Замкнутая схема импульсного преобразователя напряжения

Структурные схемы и соответствующие им дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы содержат коммутационные блоки $a(t)$, обуславливающие нестационарность. В отличие от импульсных преобразователей с постоянными элементами (стационарных устройств), в которых электромагнитные процессы описываются обыкно-

венными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами для нестационарных систем эти методы неприменимы.

В связи с указанными обстоятельствами представляется целесообразным осуществить процесс стационаризации нестационарных импульсных преобразователей модуляционного типа. Идея метода состоит в замене (переходе) в исходной периодически нестационарной системе линейного нестационарного блока с передаточной характеристикой $w(p,t)$ на эквивалентный блок с постоянными элементами $w(j\omega,\varphi)$ с комплексным коэффициентом передачи по основной гармонике исследуемого периодического движения. Впервые метод гармонической стационаризации был применен к классу систем автоматического управления с периодически изменяющимися параметрами [2].

Следует отметить, что для всех схем ИПН стационарные модели имеют одинаковый вид и структуру, отличаясь, естественно, параметрами коэффициентов гармонической стационаризации и параметрами стационарных динамических звеньев. Таким образом, с обобщенных теоретических позиций математические модели ИПН модуляционного типа с замкнутой структурой можно представить в виде, показанном на рис. 3.

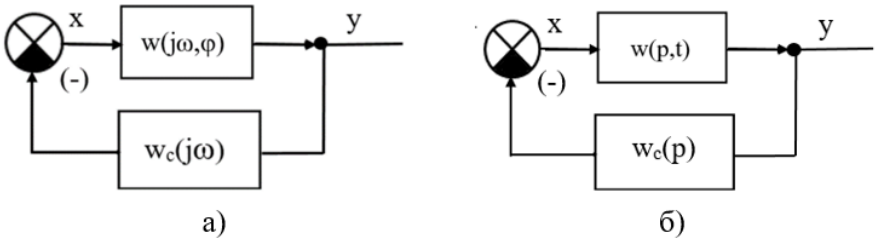


Рис. 3 Модели системы: а) стационарная; б) нестационарная

Проведем теоретическое исследование устойчивости в «малом» периодических стационарных (вынужденных) процессов в ИПН замкнутого типа при учете только внутренней ООС и работе на линейные пассивные нагрузки. Рассмотрим математическую модель преобразователя с замкнутой структурой, приведенной на рис. 2. Описать электромагнитные процессы в ИПН в непрерывном режиме можно с помощью следующей системы дифференциальных уравнений, соответствующих структурной схеме рис. 2 (1)-(4).

Коммутационные функции $a(t)$ для непрерывного режима имеют вид $a(t) = \text{sign}[\sin \omega t]$ (Рис. 4). Для более сложных ИПН они могут отличаться от меандра.

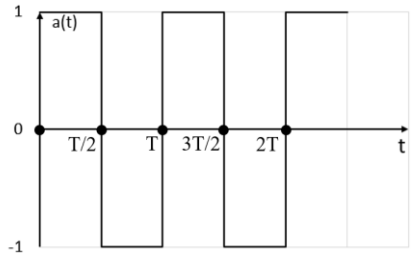


Рис. 4. Коммутационная функция $a(t) = \text{sign}[\sin\omega t]$

Перейдем от системы уравнений (1)-(4) к дифференциальным уравнениям, описывающим процессы в приращениях от установившегося (нормируемого) режима $\Delta U_н$, $\Delta i_н$, ΔU_A, Δi_A. Уравнения для отклонений от такого режима имеют вид:

$$\begin{gathered} U_A^0(t) + \Delta U_A(t) = K_\varphi(p)E - Z_\varphi(p)[i_A^0(t) + \Delta i_A(t)]; \\ i_н^0(t) + \Delta i_н(t) = Y(p)[U_н^0(t) + \Delta U_н(t)]; \\ U_н^0(t) + \Delta U_н(t) = a(t)[U_A^0(t) + \Delta U_A(t)]; \\ i_A^0(t) + \Delta i_A(t) = a(t)[i_н^0(t) + \Delta i_н(t)], \end{gathered} \tag{6}$$

где $U_A^0(t)$, $i_н^0(t)$, $U_н^0(t)$, $i_A^0(t)$ – функции описывающие процессы в ИПН для установившегося режима. Поскольку эти функции будут решениями уравнений (1)-(4), то для них справедливы равенства:

$$\begin{gathered} U_A^0(t) = K_\varphi(0)E - Z_\varphi(p)i_A^0(t); \\ i_н^0(t) = Y(p)U_н^0(t); \\ U_н^0(t) = a(t)U_A^0(t); \\ i_A^0(t) = a(t)i_н^0(t). \end{gathered} \tag{7}$$

Вычитая (7) из соответствующего уравнения (6), получаем исходные соотношения в вариациях для непрерывного режима:

$$\begin{gathered} \Delta U_A(t) = -Z_\varphi(p)\Delta i_A(t); \\ \Delta i_н(t) = Y(p)\Delta U_н(t); \\ \Delta U_н(t) = a(t)\Delta U_A(t); \\ \Delta i_A(t) = a(t)\Delta i_н(t). \end{gathered} \tag{8}$$

Для получения аналитических результатов исследования устойчивости рассматриваемой системы воспользуемся результатами теории Флоке о виде решения линейной системы с периодически изменяющимися коэффициентами. На основании данной теории частное решение периодической системы (8) имеет вид:

$$\Delta U_{\text{н}}(t) = e^{\lambda t}\Phi_1(t), \qquad \Delta i_A(t) = e^{\lambda t}\Phi_2(t) \tag{9}$$

В результате выясняется, что для системы уравнений (8) решения вида (9) могут быть получены только в случае выполнения равенства (10):

$$J = \sum_k \left[Re Z_{\text{ф}}(\lambda + jk\omega) B_k B_k^* + Re[Y(\lambda + jk\omega) C_k C_k^*] \right] = 0 \tag{10}$$

Если $B_k B_k^* = |B_k|^2 \geq 0$ и $C_k C_k^* = |C_k|^2 \geq 0$, то равенство (10) возможно только в случае, когда $\text{Re}\, Z_{\text{ф}}(\lambda + jk\omega)$ и $\text{Re}\, Y(\lambda + jk\omega)$ имеют хотя бы при некоторых k различные знаки. Поскольку рассматриваются нетривиальные решения системы дифференциальных уравнений равенства $C_k = B_k = 0$ невозможны для всех «k».

Вследствие известных свойств пассивных электрических цепей их схемные функции удовлетворяют неравенствам:

$$Z_{\text{ф}}(\lambda + jk\omega) \geq 0; \qquad Y(\lambda + jk\omega) \geq 0 \; \textit{при}\; Re\,\lambda \geq 0 \tag{11}$$

Для цепей с потерями, характерными для ИПН, неравенства всегда строгие (хотя бы для одной из цепей постоянного или переменного тока, содержащей нагрузку), поэтому равенство (10) не выполняется при $\text{Re}\,\lambda \geq 0$.

Следовательно, система дифференциальных уравнений в приращениях может иметь только затухающие частные решения с $\text{Re}\,\lambda < 0$, а это значит, что система дифференциальных уравнений (8) асимптотически устойчива.

Таким образом, ИПН с замкнутой структурой, т.е. с внутренней ООС, содержащей линейные пассивные цепи, имеют всегда устойчивые стационарные процессы. Если цепи нагрузки или фильтра ИПН не пассивны или нелинейные, то возможна потеря устойчивости стационарных процессов. Такие неустойчивые процессы при нелинейных нагрузках с падающей характеристикой зафиксированы экспериментально [3, 4].

Список используемых источников

1. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания / М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 540 с.

2. Чечурин С. Л. Параметрические колебания и устойчивость периодического движения. Издательство Ленинградского университета. 220 с.

3. Завьялов В. Н. Устойчивость автономного инвертора / Энергетика и транспорт, 1984. №º1. С. 47-50.

4. Завьялов В. Н. Условия существования стационарных процессов в автономных инверторах // Электричество, 1981. №º7. С. 56-59.

THE ANALYSES OF LOCAL STABILITY OF SWITCHING SINE VOLTAGE GENERATOR WITH THE TAKING INTO ACCOUNT PARAMETERS OF POWER SUPPLY FILTER

Dmitrikov V., Zaitseva Z., Melnikov P.
Saint Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulyanov (Lenin) "LETI"
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
LLC "Research and Production Enterprise "ADVENT"

Stationarisation makes possible to transform unstationary system of switching sine voltage generator into linear stationary system which is described by differential equations with constant parameters. The research shows the stability of the system given the passive nature of the load circuit. Whether the system is stable with an active circuit connected is an open issue.

Key words: switching voltage converter, stability of an unstationary system, inner feedback loop, local stability

УДК 621.391.82
ГРНТИ 45.37.01

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУМОСТОВЫХ СХЕМАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВЫБОР СНАББЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

В. Ф. Дмитриков, А. И. Кучерявый, П. С. Мельников, А. А. Ухов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
ООО «Научно-производственное предприятие «АДВЕНТ»

Снабберы широко используются для устранения нежелательных импульсов в цепях переключателей (MOSFET, IGBT и т.д.). Методы определения параметров снабберных (или демпфирующих цепей) различны. На практике пользуются как подбором, так и расчетом, исходя из определенных данных параметров цепи (часто из осциллограмм). В работе продемонстрирован метод выбора и расчета снаббера, исходя из известных заранее исходных данных. Полученные результаты были продемонстрированы экспериментально.

снаббер, пульсации при переключении транзисторов, демпфирующие цепи

Задача этой работы установить наиболее точные необходимые и достаточные наборы параметров, по которым можно добиться требуемых итоговых значений в цепях переключателей. Это задача, в определенном смысле, о нахождении компромиссов, так как расчет параметров, как правило, дает ряд возможных значений параметров элементов (сопротивления резистора или емкость конденсатора снаббера), и итоговый выбор может выполнять одну из нескольких поставленных задач в большей или меньшей степени, чем другую. Это возможно, когда точно не уточняются требуемые значения, такие, как время переходного процесса, максимальное напряжение возникающих колебаний, частота возникающих колебаний и т.п. Разработчику зачастую дается задача избавиться от всех негативных эффектов, однако, полного устранения нежелательных процессов, как правило, добиться невозможно, поэтому внедрением изменений в топологию и режим работы системы влияние нежелательных процессов уменьшается. В данной работе рассматривается такой общий случай, когда точной границы допустимых значений параметров системы, возникающих в результате нежелательных процессов, не указано, а разработчику требуется найти схемотехнический компромисс в устранении негативных эффектов.

Снаббер – необходимый в современном преобразователе узел, который разработчик обязан включить в состав преобразователя. Для определения параметров его структуры теоретически требуется знать значение паразитной индуктивности, которая складывается из индуктивностей конденсатора самого снаббера, дорожек на плате или проводов и выводов транзистора. Эти параметры можно попытаться измерить и найти, добавить в расчеты параметры предполагаемого конденсатора (потребуется импеданс на частоте возникающих при переключении колебаний, что тоже нелегко определить теоретически) и получить значения для конденсатора. Забегая вперед, обозначим, что авторы из своих исследований [1] обнаружили, что значений резистора влияют на работу снабберной цепи, причем, чем больше номинальное значение сопротивление резистора, тем «хуже», так как возникающий изначальный всплеск тока уменьшается, но это происходит за счет увеличения всплеска напряжения на транзисторе. Зачастую возникающий перепад напряжения по абсолютным значениям более нежелательный, чем соответствующий ему перепад тока в цепи со снаббером и без соответственно, поэтому представляется оптимальным решением использовать резистор в RC-цепи снаббера в случае, когда ограничение по току является строгим ограничением в разрабатываемой системе. Тем не менее, для охвата более обобщенного случая, рассматриваться будет снаббер с конденсатором и резистором.

На рисунке 1 изображена полумостовая структура, нижний переключатель которого снабжен снабберной цепью. L_{LK} – полная паразитная индуктивность цепи; C_{LK} – паразитная емкость, принимаемая равной емкости C_{oss} транзистора.

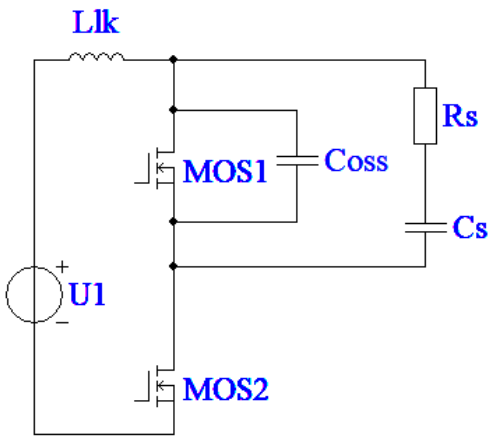


Рис. 1. Эквивалентная цепь полумостовой структуры со снаббером

При замыкании транзистора $Q2$ через индуктивность L_{LK} начинает течь ток в обратном направлении через снабберную цепь из R_S и C_S. В ранних работах [2] было описано поведение системы в этом случае. Энергия, рассеиваемая в снабберном резисторе определяется как (1):

$$W_{RS} = \frac{1}{2} C_S V_{DD}^2 + \frac{1}{2} L_{LK} I_{RM}^2, \quad (1)$$

где I_{RM} – максимальный обратный ток.

Запасаемая и потраченная на следующем такте цикла работы системы энергия конденсатора равна $\frac{1}{2} C_S V_{DD}^2$, поэтому общая энергия потерь (2):

$$W = W_{C_S} + W_{R_S} = C_S V_{DD}^2 + \frac{1}{2} L_{LK} I_{RM}^2. \quad (2)$$

Первое слагаемое в выражении обусловлено работой снаббера, второе же является энергией, затрачиваемой системой всегда, даже без подключенного снаббера. Мощность потерь из-за снаббера таким образом составляют (3):

$$P_{snubber} = C_S V_{DD}^2 f_{sw}. \quad (3)$$

Выбор резистора осуществляется, как правило, исходя из выбранного значения конденсатора. Выбор конденсатора же и является упомянутым выше компромиссом между ограничением пульсаций напряжения при переключении и КПД. Выделяют два условия, ограничивающих выбор конденсатора. Емкость должна быть достаточной большой, чтобы иметь возможность запасать всю ту энергию, которая поступает из паразитных индуктивностей. Емкость должна быть достаточно малой, чтобы за время включенного состояния транзистора полностью разрядиться до следующего выключения (4).

$$\begin{gathered} \frac{1}{2} C_S V_{DD}^2 > \frac{1}{2} L_{LK} I_{RM}^2 \\ C_S < \frac{t_{on}}{x} \frac{1}{R_S}. \end{gathered} \quad (4)$$

Выражения выше описывают названные два условия. x здесь обозначается как быстро необходимо окончить переходный процесс переключения. По сути, $\frac{t_{on}}{x}$ это τ – постоянная времени RC-цепи. Стабильно безопасным вариантом считается выбирать $x = 10$. Таким образом, область допустимых значений для конденсатора снаббера определяется отрезком

$$\frac{L_{LK}I_{RM}^2}{V_{DD}^2} < C_S < \frac{t_{on}}{x}\frac{1}{R_S}. \quad (5)$$

По экспериментальным данным мы так же можем определить и границы допустимых значений для резистора. Они определяются из коэффициента демпфирования. Этот коэффициент показывает, насколько быстро прекращается колебательный процесс при переключении. Чем он больше, тем быстрее процесс подходит к концу, но и тем больше энергии в единицу времени поглощается снабберной цепью. Коэффициент демпфирования определяется как (6):

$$\zeta = \frac{R_S}{2}\sqrt{\frac{C_S}{L_{LK}}}. \quad (6)$$

Ограничивающее условие представляем таким образом (7):

$$0{,}5 < \frac{R_S}{2\sqrt{\frac{C_S}{L_{LK}}}} < 1. \quad (7)$$

А оптимальное значение резистора в таком случае (8):

$$\sqrt{\frac{C_S}{L_{LK}}} < R_S < 2\sqrt{\frac{C_S}{L_{LK}}}. \quad (8)$$

Следующий вопрос заключается в том, как можно определить значения L_K и C_K для системы, к которой требуется подключить снаббер. Мы можем измерить эти значения, ничего не упустив и имея специальную аппаратуру [3]. Однако, имеется более подходящий метод. Исходя из Рис. 1, исключив из него снаббер, мы можем записать уравнение свободных колебаний контура (9):

$$f_{\text{св}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{LK}C_{LK}}}. \quad (9)$$

Подключим дополнительный конденсатор параллельно к ключу. После преобразований получаем (10):

$$C_{LK} = \frac{C_{\text{доп}}}{\frac{f_{\text{св}}}{f_{\text{св}_{\text{доп}}}} - 1}. \quad (10)$$

Значение емкости данного конденсатора не ограничивается, однако, необходимость в снабберной цепи создается возможными перенапряжениями, которые могут вывести устройство из строя, и подавать питание на устройство без снабберной цепи в таком случае небезопасно даже при малой доли от максимальной нагрузки. Сложно рекомендовать определен-

ный номинал конденсатора, однако, принимая во внимание предполагаемые скачки напряжения в 2-3 напряжения питания и частоту коммутации можно сделать выбор между конденсаторами в 1 мкФ, 100 нФ, 10 нФ и 1 нФ.

Так или иначе, получаем осциллограммы для вариантов с пробным конденсатором и без него, из которых находятся соотношение частот свободных колебаний контуров, а затем, значения C_{LK} и L_{LK} (рис. 2).



а) б)

Рис. 2. Колебания, возникающие при переключении транзистора в системе: а) без конденсатора; б) со встроенным конденсатором 7,2 нФ

При сравнении частоты возникающих колебаний на Рис. 2 а) и б) отмечается $f_{\text{св}} = 8{,}621$ МГц, $f_{\text{св}_{\text{доп}}} = 7{,}752$ МГц. Таким образом, получаем значения паразитных параметров системы $C_{LK} = 29$ нФ, $L_{LK} = 11{,}8$ нГн. Исходя из исходных данных $U_{\text{вх}} = 24$ В, $I_{\text{вых}} = 0{,}2$ А, $f_{sw} = 1$ кГц, выбирается C_S, удовлетворяющий условию (5), например, 10 нФ. И резистор R_S, удовлетворяющий условию (7) принимается 9,1 Ом.

Данный снаббер устанавливается на плату, оцениваются изменения в режиме возникновения колебаний:

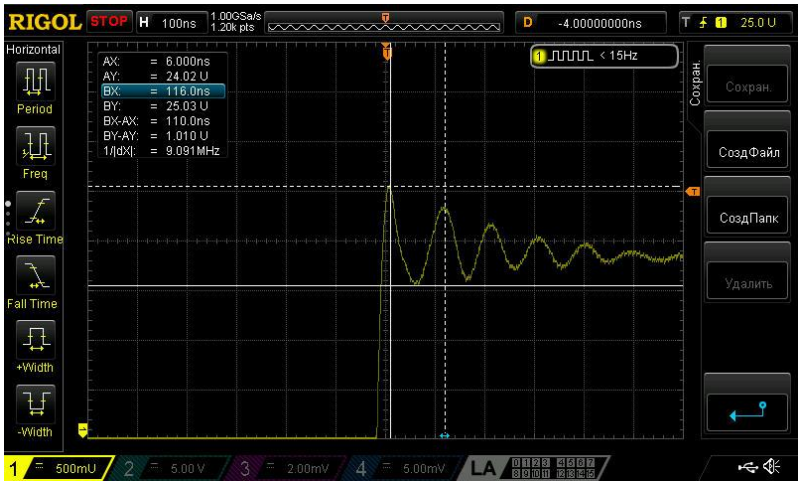


Рис. 3. Колебания при переключении транзисторов с установленным снаббером

Установленный снаббер помог сократить амплитуду возникающих колебаний с 1,6 В до примерно 1 В, что желательно, но не является существенным изменением, тем не менее, это указывает на то, что данный способ расчета может применяться и быть полезен. На возникающие в процессе переключения транзисторов процессы, как указывается, влияют паразитные параметры спроектированной системы. Если плата разведена не самым удачным образом и паразитные индуктивности оказываются сильно больше полученного в результате исследования значения 11,8 нГн, то амплитуда возникающих колебаний и влияние рассчитываемого по соответствующим значениями снаббера окажутся намного значительнее, поэтому снаббер является приемлемым решением для погашения возникающих в полумостовых и мостовых систем колебаний в ситуации, когда переразвести плату нет возможности.

Список используемых источников

1. Новиков П. Снаббер – это просто // Силовая электроника. 2019. № 2.
2. McMurray W. Optimum Snubbers for Power Semiconductors // in IEEE Transactions on Industry Applications, 1972. Vol. IA-8. № 5. PP. 593-600. DOI: 10.1109/TIA.1972.349788.
3. Пол Ли, Д-р Маркус Хердин, Выбор, проектирование и расчет схемы снаббера // Силовая Электроника. 2022. № 2.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры Э СПбГУТ, доктором технических наук, профессором В. Ф. Дмитриковым.

OPTIMIZATION OF DYNAMIC PROCESSES IN HALF-BRIDGE CIRCUITS. ANALYSES AND METHOD OF CONSTRUCTING A SNUBBER CIRCUIT

Dmitrikov V., Kucheryavyi A., Melnikov P., Uhov A.
Saint Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulyanov (Lenin) "LETI"
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
LLC "Research and Production Enterprise "ADVENT"

Snubbers are widely used to get rid of pulsations caused by transistor switching. Methods to determine what components and parameters should snubber circuit have are different. So this articles presents a method to design RC-snubber based on parameters which can be determined for almost any bridge circuit.

Key words: snubber, transistor switching pulsations, damper curcuit

УДК 530.145
ГРНТИ 14.35.09

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ» ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

О. А. Долматова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена решению методической проблемы – низкой заинтересованности студентов инженерных специальностей в изучении абстрактных основ квантовой механики. Вместо теоретических рассуждений предлагается использование современных ИИ-сервисов (например, DeepSeek) при разработке задач для практических занятий. Основная цель статьи – показать, что ИИ служит эффективным помощником в рутинной работе преподавателя по подготовке учебных материалов.

практико-ориентированные задачи по физике, основы квантовой механики, инженерные специальности

Раздел «Основы квантовой механики» в рамках дисциплины «Физика конденсированного состояния» для специальности 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» в СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича является для студентов камнем преткновения, поскольку студенты инженерных специальностей с трудом воспринимают абстрактный математический аппарат и концепции, которые нельзя «пощупать» или измерить с помощью приборов.

Основная задача преподавателя, чтобы не потерять внимание и интерес студентов во время занятий, не столько в объяснении теории, сколько в необходимости постоянно отвечать на вопрос студентов: «Где мне это пригодится в моей специальности?». Будущему инженеру-электронику важно не столько решить уравнение Шредингера для конкретной квантовой задачи, сколько понимать, как следствия решения определяют свойства материалов, работу и характеристики приборов и т.д.

Поэтому главная идея статьи – показать, как использовать инструменты современных ИИ-сервисов (например, DeepSeek [1]) при создании практико-ориентированных задач для рассмотрения на практических занятиях, чтобы сделать квантовую физику понятнее будущим инженерам.

Прежде всего, необходимо правильно сформулировать промпт, то есть сделать запрос конкретным, как если бы потребовалось описать постановку задачи коллеге, иначе абстрактный запрос типа «напиши задачу по квантовой механике для инженеров» выдаст бесполезный результат. Чем детальнее сформировать запрос, тем ближе к цели и интереснее будет результат. Например, при изучении характеристик фотонов можно акцентировать внимание на том, чтобы содержание задачи было связано с работой светодиода. Для этого в условии должна быть указана конкретная длина волны излучения светодиода в нанометрах или энергия в электронвольтах, и сам вопрос задачи должен звучать как практический: «определить, сколько фотонов в секунду излучает диод при заданном токе».

Второй шаг – это экспертиза. Необходимо оценить, не противоречат ли числа в задаче реальности: например, предложенная длина волны, излучаемая светодиодом, 850 нм, а не 85 мкм. Проанализировать, соответствует ли контекст специальности, все ли понятно в условии, нет ли запутывающей лишней информации и т.д.

Поэтому следующий шаг – это доработка и превращение в рабочий материал. Здесь очень важен будет опыт преподавателя для оживления сырой заготовки. Например, уточнить, что речь идет о световоде инфракрасного диапазона или о светоизлучающем элементе в оптронной паре. Чтобы создать связь с будущей специальностью, необходимо чтобы вопрос в задаче имел практический смысл, например, «достаточна ли энергия фотона для создания электрон-дырочной пары в кремниевом фотоприемнике». Это простимулирует студентов не только вспомнить нужную формулу, но и найти пороговые значения для материалов.

С другой стороны, опытный преподаватель уже имеет достаточно большую базу задач (из сборников под редакцией И. В. Савельева, В. С. Волькенштейн и др. [2]), которые считает необходимыми для рассмотрения на практическом занятии и может с помощью инструментов ИИ оживить их, добавив инженерный контекст.

В качестве примера можно привести стандартную задачу по теме «Гипотеза де Бройля»: определить длину волны де Бройля электрона, ускоренного разностью потенциалов $U = 100$В. Промпт для ИИ может выглядеть следующим образом: для учебной задачи на формулу де Бройля создай инженерный контекст, предложи 3-4 реальных прибора или технологии, где принципиально важна длина волны электрона (например, электронный микроскоп), подбери реальные числовые значения ускоряющего напряжения

в вольтах. Примерный ответ ИИ на такой запрос выглядит следующим образом: «Рассчитайте длину волны де Бройля электрона в колонне сканирующего микроскопа, ускоряющее напряжение в котором составляет U = 15кВ. Объясните как полученная величина связана с максимально возможным разрешением микроскопа?».

Еще пример достаточно сложной для понимания темы квантовой механики – «Принцип неопределенности Гейзенберга». Взяв типовую задачу из учебника: «Оценить неопределенность скорости электрона в атоме водорода, считая, что неопределенность его координаты Δx равна радиусу атома ($\sim 10^{-10}$ м)», необходимо запросить у ресурса ИИ прикладной контекст и точные параметры. Промпт будет выглядеть примерно следующим образом: «В каких современных нанотехнологических устройствах принципиально важна оценка неопределенности положения и импульса электрона? Приведи примеры: например, квантовые точки. Каков типичный размер области локализации электрона (аналог Δx) в таких приборах в нанометрах?». В результате получаем практико-ориентированную задачу: «В лаборатории создана квантовая точка для исследования одноэлектронных эффектов. Электрон в ней ограничен областью размером L = 20 нм (это можно считать неопределенностью координаты Δx). Оцените минимальную неопределенность скорости электрона внутри этой точки. Полученную неопределенность скорости сравните с дрейфовой скоростью электрона в обычном транзисторе ($\sim 10^5$ м/с). Сделайте вывод, почему в наноразмерных устройствах квантовые эффекты неопределенности становятся принципиально важными?». При такой формулировке задачи смещается фокус внимания с абстрактного объекта – атома на реальный инженерный – нанообъект.

Таким образом, задача не создается с нуля, а, используя инструменты ИИ, адаптируется к актуальным инженерным областям и параметрам, чем повышает ее ценность для мотивации студентов, для которых задача из учебника превращается в инженерный расчет.

Возможность обращения к инструментам ИИ дает несомненные практические плюсы в работе преподавателя. Конечно, прежде всего, это скорость подготовки учебных материалов: за 10-15 минут можно сгенерировать несколько примеров задач по нужной теме, что позволит больше времени уделить на продумывание самого хода занятия. Становится легко адаптировать задания под любую специальность студентов – достаточно изменить промпт. Например, для студентов-программистов в упомянутой выше за-

даче запросить аналогию с квантовыми битами. Так условие задачи станет ближе и понятнее студентам, поскольку они увидят связь со своей будущей профессией. Безусловно, это сделает теорию дисциплины наглядной, позволит перекинуть мост от сложной математики к конкретным устройствам, которые их окружают.

Но у этой методики есть и свои подводные камни. ИИ не знает физику, математику и др. Только преподаватель владеет необходимыми знаниями. Самый главный риск – полностью довериться сгенерированному условию задачи без экспертной проверки. Поэтому ручная правка, критическое мышление преподавателя и верификация остаются необходимыми при обращении к инструментам ИИ.

В рамках дисциплины «Физика конденсированного состояния» в СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича на практических занятиях у студентов второго курса, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника», был опыт использования задач, созданных по описанному алгоритму.

После объяснения теории на лекции по теме «Квантовая частица в потенциальной яме» было разобрано не абстрактное задание из учебника, а задача, сгенерированная с помощью ИИ-сервиса DeepSeek и адаптированная для студентов: «В активной области синего лазерного диода используется квантовая яма из нитрида галлия (GaN) толщиной $L = 3$нм. Эту ситуацию можно смоделировать как задачу о частице в бесконечно глубокой яме для электрона в зоне проводимости. Рассчитайте энергию основного состояния в такой яме (эффективную массу электрона в GaN принять равной $0.2m_e$). Объясните, как распределение плотности вероятности для этого состояния связано с тем, где наиболее вероятно найти электрон внутри активного слоя. Почему инженеры, меняя толщину ямы L, могут управлять длиной волны излучения диода?».

После решения и обсуждения задачи, сформулированной таким образом, снизился барьер отторжения, снялся вопрос «зачем нам как инженерам это нужно», поскольку связь с техникой была заложена прямо в условии. Сильные студенты были вовлечены в дискуссию, вопросы были предметными. Конечно, для части студентов группы сгенерированная задача осталась все еще слишком сложной и перегруженной техническими деталями. Это стало сигналом, что задача должна оставаться учебной. Цель – не запутать студента отраслевой спецификой, а показать, как базовая формула из теории работает в прикладном контексте.

Конечно, использование инструментов ИИ не сделает студентов отличниками в области квантовой физики, поскольку фундаментальные сложности теории никуда не денутся, однако поможет в осмыслении темы в прикладном ключе. А для преподавателя – станет рабочим инструментом, который поможет удерживать внимание и интерес студентов на практической цели изучаемого раздела, не теряя при этом научной строгости решения, сделать курс читаемой дисциплины более живым без лишних временных затрат.

Список используемых источников

1. Deepseek. Официальный сайт. URL: https://chat.deepseek.com/ (дата обращения 12.11.2025).

2. Савельев, И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике: учеб. пособие / И. В. Савельев. 7-е изд., стер. М.: Лань, 2016. 292 с.: ил. (Учебники для вузов. Спец. лит.) (Клас. задачники и практикумы). URL: https://e.lanbook.com/book/71766#authors. (дата обращения 12.11.2025). ISBN 978-5-8114-0638-8: Б. ц.

USING AI TO CREATE PRACTICE-ORIENTED PROBLEMS ON THE TOPIC «FUNDAMENTALS OF QUANTUM MECHANICS» FOR ENGINEERING SPECIALTIES

Dolmatova O.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article addresses a methodological issue: the low interest of engineering students in studying the abstract foundations of quantum mechanics. Instead of theoretical reasoning, it proposes using modern AI services (e.g., DeepSeek [1]) to develop problems for practical exercises. The main goal of the article is to demonstrate that AI serves as an effective assistant in the routine work of teachers preparing educational materials.

Key words: practice-oriented problems in physics, fundamentals of quantum mechanics, engineering specialties

УДК.681.51
ГРНТИ 47.05.05

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КУРСА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»: ОТ СОДЕРЖАНИЯ К ЦИФРОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

З. В. Зайцева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматриваются вопросы создания электронного курса по фундаментальной инженерной дисциплине «Теория электрических цепей» для направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» профиль «Промышленная электроника» с учетом требований современного технического образования. Актуальность работы обусловлена необходимостью трансформации традиционных образовательных практик в цифровую среду без потери академической строгости и практикоориентированности. Предложена методическая модель курса, базирующая на рабочей программе курса, включающая принципы структурирования содержания, организацию интерактивного взаимодействия, систему оценивания и разработку виртуальных лабораторий. Особое внимание уделено технологической реализации, включающей в себя использование специализированных сред моделирования (FASTMEAN, Mathcad) для создание виртуальных лабораторных работ, применение LMS-платформы Moodle для автоматической проверки результатов освоения материала. Методические решения включают поэтапную подачу материала, систему обратной связи для повышения мотивации обучающихся.

электронный курс, рабочая программа дисциплины, методическая модель курса, виртуальный лабораторный практикум, специализированные среды моделирования (FASTMEAN, Mathcad), LMS-платформа Moodle

В современном образовательном процессе электронные курсы становятся неотъемлемой частью подготовки студентов технических специальностей [1 – 3]. Дисциплина «Теория электрических цепей» (ТЭЦ), являясь фундаментальной для будущих инженеров в области телекоммуникаций и электроники, требует не только глубокого теоретического понимания, но и практических навыков моделирования и анализа. Создание электронного курса по ТЭЦ позволяет систематизировать материал, сделать его доступным в любое время и повысить эффективность обучения через интерактивные элементы и мультимедийные ресурсы.

Рабочая программа дисциплины ТЭЦ для направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» профиль «Промышленная электроника» имеет трехмодульную структуру: лекции (32 часа), практические занятия (26 часов) и лабораторный практикум (24 часа), что полностью соответствует учебной программе СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Создание электронного курса по дисциплине ставит перед преподавателем задачу не просто переноса традиционных материалов в электронную среду, а создания дидактически целостных образовательных продуктов, позволяющим усвоить сложный теоретический материал и далее применить его для анализа и синтеза электрических цепей. Дисциплина ТЭЦ, являясь базовой для подготовки инженеров связи, радиотехники и электроники, обладает рядом методических особенностей, требующих особого подхода к цифровизации: высокая абстрактность математического аппарата, необходимость формирования системного мышления, тесная связь теории с практикой моделирования и измерений.

Электронный курс по ТЭЦ включает в себя:

1. Аннотацию и рабочую программу дисциплины, которая позволяет студенту видеть объем и содержание дисциплины, а также оценить предполагаемый конечный результат обучения.

2. Учебную информацию в форме лекций, практический занятий и лабораторного практикума.

3. Методические указания по выполнению лабораторных работ, по решению задач и выполнению курсовой работы.

4. Список основной и дополнительной литературы и ссылки на нее.

5. Контрольно-измерительные материалы в виде тестов, учебных задач.

Электронный курс по ТЭЦ имеет следующую структуру: лекции, практические занятия и лабораторные работы.

Лекции (32 часа) представлены в виде 16 отдельных лекций, которые сгруппированы в соответствии с восьмью разделами курса ТЭЦ. К каждой лекции разработан комплекс контрольных вопросов для проверки усвоения материала в виде тестов на LMS – платформе Moodle и классических вопросов. Изучение лекции настраивается таким образом, что в случае неверного ответа на контрольные вопросы и неправильного ответа на тесты студент направляется на повторное изучение лекционного материала.

Практические занятия (26 часов) представлены в виде 13 отдельных тем, каждая из которых относится к соответствующему разделу курса. Фор-

мат практического занятия представляет пошаговые разборы задач, сопровождаемые построением графиков и проверкой решения задач в программе Fastmean, позволяющей провести анализ электрической цепи в режиме постоянного тока, в режиме гармонических колебаний, в частотной и временной областях, а также провести символьный анализ с использованием операторного метода. Студенты получают набор задач для самостоятельного решения.

Практический блок включает в себя курсовую работу, посвященную анализу ARC-фильтров и синтезу LC-фильтров. Студенты получают задание по курсовой работе. Ее выполнение помимо аналитических расчетов предполагает расчеты фильтров в Mathcad и моделирование характеристик фильтров в Fastmean.

Такие элементы курса как форум, чат позволяют ответить на все возникающие вопросы в процессе выполнения курсовой работы.

Лабораторные работы (24 часа) представлены в виде 11 виртуальных лабораторных работ [4-5] на базе программы FASTMEAN и Mathcad. Лабораторные работы охватывают все разделы курса от анализа переходных процессов до исследования фильтров и нелинейных цепей. Есть возможность загрузки результатов, проверка отчетов, даны методические рекомендации по выполнению работ.

Предлагаемая структура курса лекция → практика → лабораторная проходится в три этапа.

Первый этап ознакомительный. В процессе первого этапа происходит изучение материала лекции в электронном виде, студенты проходят проверочный тест на понимание базовых закономерностей.

Второй этап аналитический. На этом этапе идет пошаговый разбор типовых задач, создан форум для обсуждения вопросов, возникающих при самостоятельном решении задач, под модерацией преподавателя.

Третий этап это этап моделирования. На данный этапе выполняются виртуальные лабораторные работы в среде, приближенной к профессиональной (Fastmean, Mathcad). Студенты получают задание на проектирование простой цепи с заданными характеристиками, выполняют виртуальные лабораторные работы, оформляют отчеты по выполненным работам, защищают лабораторные работы, проходят тесты.

Электронный курс позволяет сдать экзамен и защитить курсовую работу на LMS- платформе Moodle. Для этого создаются специальные тесты для оценки знаний студентов [6].

Таким образом, электронный курс позволяет поэтапно изучать дисциплину, двигаясь от простого к сложному, в соответствии с учебным планом

и рабочей программой дисциплины. Существует обратная связь, студент может в форуме обсуждать практические задания для самостоятельной работы, получать комментарии преподавателя по итогам выполненных работ. Возможна организации системы рейтинговых таблиц для мотивации студентов.

В результате, к преимуществам электронного курса можно отнести:

– гибкость обучения – студенты могут изучать материал в удобное для себя время и в удобном темпе;
– наглядность – моделирование процессов в электрических цепях с использованием программы Fastmean позволяет визуализировать сложные процессы в электрических цепях;
– практикоориентированность – виртуальные лаборатории заменяют или дополняют физическое оборудование;
– экономия времени – возможность проверки освоения материала с помощью тестов;
– актуальность – возможность быстрого обновления содержания электронного курса в соответствии с меняющимся учебным планом и рабочей программой дисциплины.

Создание электронного курса по «Теории электрических цепей» – это шаг в сторону современного, технологичного и доступного инженерного образования. Такой курс не только сохраняет академическую строгость традиционной программы, но и обогащает ее интерактивными и практическими элементами, что способствует более глубокому усвоению материала и подготовке квалифицированных специалистов для высокотехнологичных отраслей. Реализованный подход демонстрирует, как цифровизация образовательного процесса по изучению ТЭЦ способствует глубокому усвоению теоретических основ, развитию практических навыков моделирования и повышению конкурентоспособности будущих инженеров в условиях цифровой трансформации высокотехнологичных отраслей Внедрение цифровых инструментов в обучение ТЭЦ отвечает вызовам времени и повышает конкурентоспособность выпускников на мировом рынке труда.

Список используемых источников

1. Баринова Н. В. Проблемы развития дистанционного и электронного образования в России // ИТпортал, 2017. № 2 (14). URL: http://itportal.ru/science/tech/problemy-razvitiya-distantsionnogo-/ (дата обращения 15.11.2025).

2. Гильмутдинов А. Х., Ибрагимов Р. А., Цивильский И. В. Электронное образование на платформе MOODLE / А. Х. Гильмутдинов, Р. А. Ибрагимов, И. В. Цивильский. Казань: КГУ, 2008. 169 с.

3. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Возможности человеко-машинного взаимодействия в обучающей среде технического вуза. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С. 558-563.

4. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Компьютерный расчет линейных и нелинейных цепей при постановке виртуальных лабораторных работ. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019); сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. 2019. С. 401-406.

5. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Виртуальный лабораторный практикум для технических дисциплин при дистанционном обучении. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021); сборник научных статей X Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. Санкт-Петербург, 2021. С. 218-223.

6. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Принципы разработки итоговых тестов проверки знаний с использованием системы LMS. В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). Сборник научных статей XI Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2022. С. 275-279.

DEVELOPMENT AND CREATION OF A VIRTUAL LABORATORY PRACTICUM FOR STUDYING THE STABILITY OF ACTIVE TWO-PORT NETWORKS

Zaitseva Z.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article addresses the development of an electronic course for the fundamental engineering discipline «Theory of Electrical Circuits» within the field of study 11.03.04 «Electronics and Nanoelectronics,» specialization «Industrial Electronics,» in accordance with the requirements of modern technical education. The relevance of this work stems from the necessity to transform traditional educational practices into a digital environment without compromising academic rigor and practical orientation. A methodological model of the course is proposed, based on the working curriculum and encompassing principles of content structuring, organization of interactive engagement, assessment systems, and development of virtual laboratories. Particular attention is given to technological implementation, including the use of specialized simulation environments (FASTMEAN, Mathcad) for creating virtual laboratory assignments and the application of the Moodle LMS platform for automated verification of learning outcomes. The methodological approach incorporates phased content delivery and a feedback system designed to enhance student motivation.

Key words: electronic course, course syllabus, methodological model of the course, virtual laboratory practicum, specialized simulation environments (FASTMEAN, Mathcad), Moodle LMS platform

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.29

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ШИРОКОПОЛОСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ ДЛЯ ДИАПАЗОНА UWB В РОССИИ

К. О. Коровин, С. И. Федоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье представлен расчет спиральной антенны для сверхширокополосного (UWB) диапазона частот в России. Представлены алгоритм расчета геометрических параметров антенны, а также результаты ее компьютерного моделирования. Описаны ключевые этапы проектирования: выбор конфигурации спирали, анализ диаграммы направленности и коэффициента усиления. Результаты могут быть использованы при создании различных радиосистем, требующих широкой полосы рабочих частот.

спиральная печатная антенна, UWB, СШП диапазон, сверхширокополосная антенна

Спиральная печатная антенна [1] (СПА) является классическим примером печатной сверхширокополосной или частотнонезависимой антенны способной сохранять свои рабочие характеристики в широком диапазоне частот. В данной статье предлагается конструкция, описанной выше антенны, для диапазона UWB в России.

Исходя из приложения № 14 к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. N 07-20-03-001 (ред. от 27.09.2023) о сверхширокополосных беспроводных устройствах, выделенный диапазон для подобного рода устройств: 2850-10600 МГц с дополнительными ограничениями по значениям максимальной спектральной плотности для отдельных поддиапазонов.

Для расчета была выбрана самодополняющая СПА на спирали Архимеда, т.к. она проста в изготовлении и в общем случае обладает удовлетворительными характеристиками при интеграции ее в сверхширокополосные системы.

Расчет базовой геометрии проводящего слоя печатной спиральной антенны, исходя из ограничений по верхней (ВРЧ) и нижней (НРЧ) рабочей частоте, представлен ниже:

$$f_{high} = \frac{C}{2\pi r_1} \rightarrow r1 = 4.5 \text{ мм}$$
$$f_{low} = \frac{C}{2\pi r_2} \rightarrow r2 = 16.753 \text{ мм},$$

где f_{high} – это ВРЧ, r1 – внутренний радиус СПА, а f_{low} – это НРЧ и r2 – внешний (максимальный) радиус СПА, соответственно. На практике же радиус для нижней частоты следует выбирать чуть больше, примерно на 5 %. Так для моделирования был выбран r2 = 17.635 мм.

Верхняя частота соответствует минимальному первому витку спирали, наиболее близко расположенному к точке питания. Таким образом выбор способа питания, а также максимальное разрешение технического процесса будут определять максимально возможную ВРЧ СПА. Нижняя частота же в общем случае будет влиять лишь на габариты устройства.

Основным же недостатком СПА является двунаправленная ДН, ввиду этого рационально использовать металлический рефлектор на расстоянии в четверть рабочей длины волны, однако в этом случае СПА теряет свои частотнонезависимые характеристики. Одним из наиболее простых решений данной проблемы является использование слоя поглотителя под СПА для предотвращения переотражения, однако это приводит к обязательному ухудшению коэффициента усиления антенны ≥ 3 dB. Ввиду этого синтез широкополосного отражателя является следующим шагом при разработке антенны.

В данный момент существует несколько путей синтеза широкополосного излучателя:

Первый вариант – синтез HIS или EBG структуры для отражателя [2, 3]. Данный тип материала в некотором диапазоне частот проявляет себя схоже с идеальным магнитным проводником. Однако влияние его на диаграммообразование сложнее, ввиду этого описание и синтез подобного рода отражателя сам по себе является достаточно трудной задачей.

Второй вариант – использование металлического отражателя на расстоянии много меньшем чем в четверть длины волны на НРЧ [4]. Данный способ реализации отражателя ухудшает некоторые характеристики СПА, однако он также сильно упрощает как расчет и моделирование, так и производство самой антенны, поэтому для данной статьи был выбран этот способ. В дальнейшем предполагается использование HIS отражателя и сравнение способов реализации отражателя на характеристики СПА.

Моделирование проводилось в ANSYS Electronics desktop. Размеры структуры приведены в таблице 1. Для сравнения также было проведено моделирование антенны без отражателя.

ТАБЛИЦА 1. Геометрические параметры СПА

Наименование	Величина
R1 – внешний радиус	17.6349 мм
R2 – внутренний радиус	4.504 мм
H1 – расстояние до рефлектора	11.25 мм
W – ширина полоска	2 мм
N – количество витков	4.409
Material – материал подложки	Вакуум

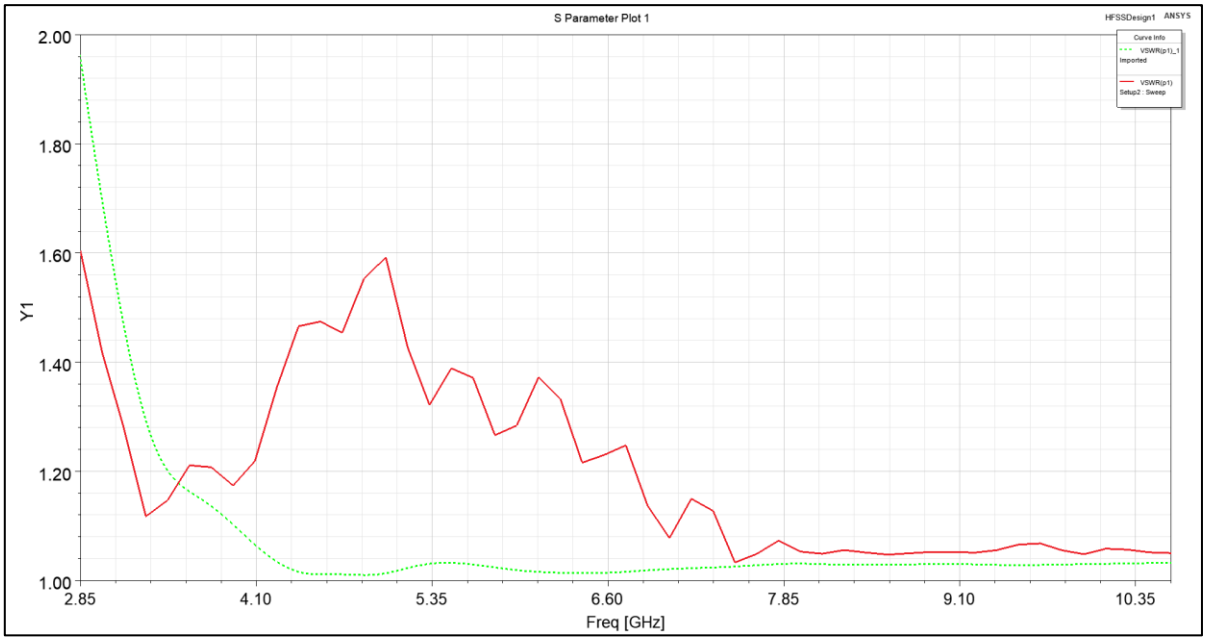


Рис. 1. КСВН спиральной антенны с отражателем (сплошная линия) и без отражателя (пунктирная линия)

На рисунке 1 представлен график зависимости КСВН рассчитанной антенны от частоты. Для сравнения также представлен график спиральной антенны без отражателя. Добавление отражателя и поглотителя на концах спиральной антенны незначительно ухудшают КСВН и он остается в пределах удовлетворительных значений во всем рабочем диапазоне.

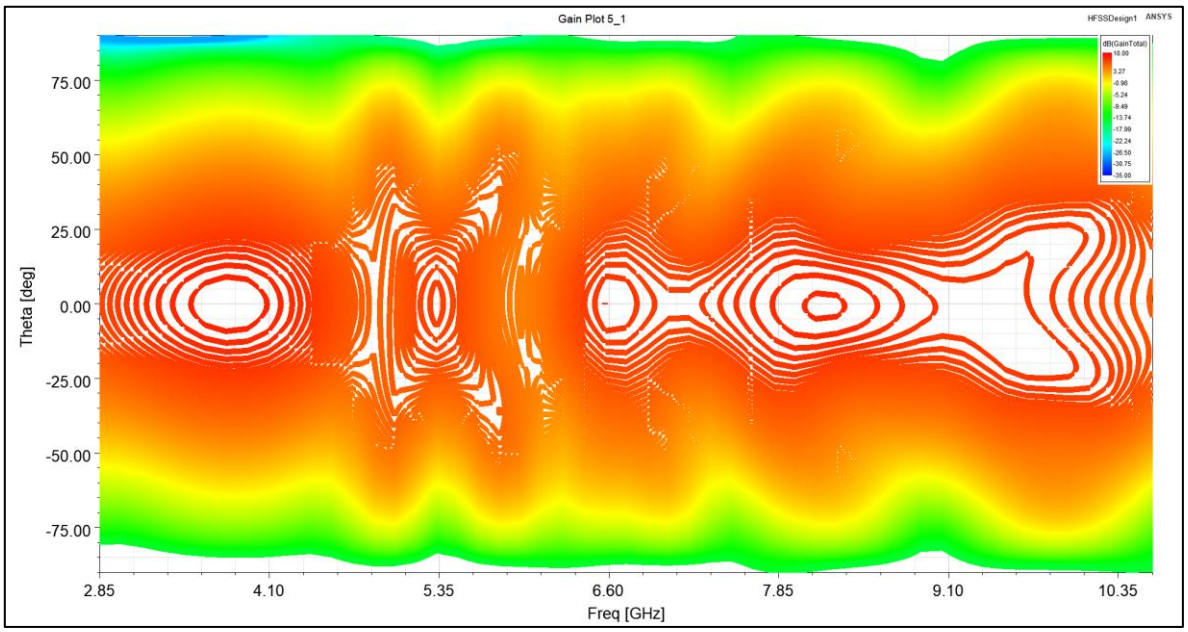


Рис. 2. Зависимость диаграммы направленности в зависимости от частоты

Диаграмма направленности СПА тоже остается однонаправленной.

Последним параметром для оценки является коэффициент эллиптичности (КЭ) антенны. В идеальном случае спиральная антенна без отражателя в вакууме излучает кругло поляризованную волну. Однако при добавлении рефлектора картина несколько ухудшается, однако стоит отметить, что значение КЭ теоретически может быть оптимизировано подбором поглощающего материала.

В данной статье была рассчитана геометрия спиральной печатной антенны для диапазона UWB в России. Также были проанализированы результаты моделирования подобной антенны и представлены ее характеристики.

Список используемых источников

1. J.A. Kaiser, “The Archimedean two-wire spiral antenna”, IEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. 8, № 3, 312-323, 1960.

2. Bell and Iskander, «A low-profile Archimedean spiral antenna using an EBG ground plane,» in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 3. PP. 223-226, 2004, doi: 10.1109/LAWP.2004.835753.

3. Tanabe, Masahiro & Nakano, H.. (2020). Low-Profile Wideband Spiral Antenna With a Circular HIS Reflector Composed of Homogenous Fan-Shaped Patch Elements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. PP. 1-1. 10.1109/TAP.2020.2980365.

4. Djoma, Christopher & Begaud, Xavier & Lepage, Anne & Mallégol, Stéphane & Jousset, Michel. (2012). Wideband reflector for Archimedean spiral antenna. Proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012. 776-780. 10.1109/EuCAP.2012.6206145.

CALCULATION AND MODELING OF A SPIRAL ANTENNA WITH A BROADBAND REFLECTOR FOR THE UWB FREQUENCY RANGE IN RUSSIA

Korovin K., Fedorov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article presents the calculation of a spiral antenna for the ultra-wideband (UWB) frequency range in Russia. An algorithm for calculating the geometric parameters of the antenna, as well as the results of its computer modeling are presented. The key stages of the design are described: the choice of the configuration of the spiral, the analysis of the radiation pattern and gain. The results can be used to create various wideband radio systems.

Key words: printed spiral antenna, UWB band, ultra-wideband antenna

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ЗАЩИТЫ ОТ ПОМЕХ НА БПЛА С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

К. О. Коровин, П. А. Межевов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Развертывание современных сетей связи на базе БПЛА ведет к существенному росту числа пространственно-распределенных источником радиоизлучения. Это усложняет помеховую обстановку и обуславливает необходимость повышения помехоустойчивости таких систем. В данной работе предлагается совместное использование переключаемой антенной решетки и компенсационного метода защиты от помех, позволяющее скомпенсировать помехи в направлениях, отличных от максимума диаграммы направленности (ДН) активной антенны из переключаемой решетки.

Бортовая антенна, переключаемая антенная решетка, компенсационный метод защиты от помех

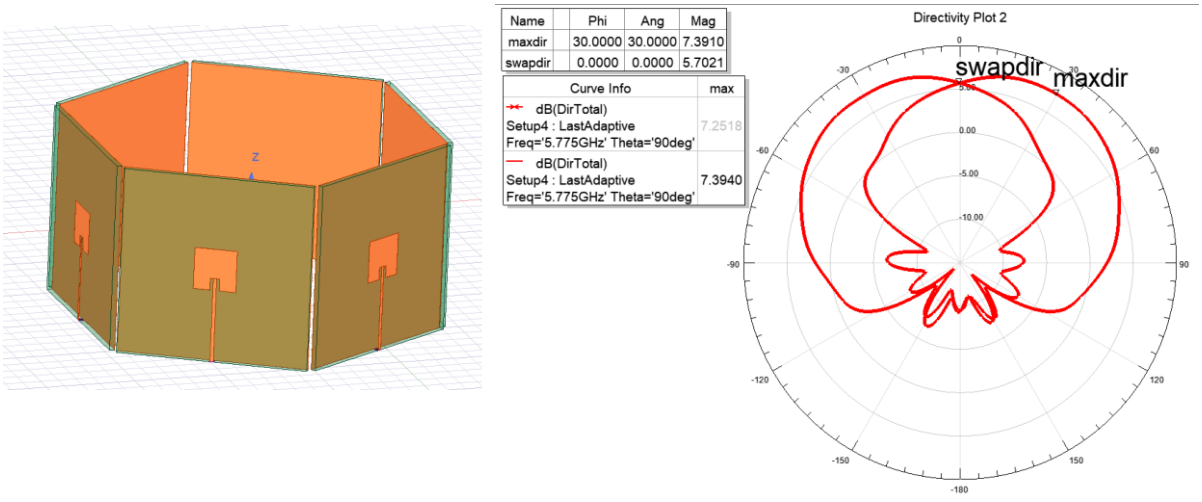
Расширение областей применения БПЛА в современном мире приводит к необходимости развития радиотехнического оборудования, используемого на борту БПЛА [1]. В качестве ограничивающего фактора в первую очередь выступают массогабаритные параметры используемой техники.

В свою очередь требования к бортовой антенной системе также ограничивают выбор излучателей. Как правило, на БПЛА, используются всенаправленные антенны, так как связь происходит с мобильным объектом, который может менять свои координаты, как по высоте, так и по азимуту от наземной станции.

В работе [2] рассмотрена переключаемая малоэлементная антенная решетка, которая позволяет увеличить дальность связи с БПЛА, но не теряет условную всенаправленность системы. На рисунке 1 представлен внешний вид и диаграмма направленности предложенной антенной решетки. Маркер maxdir обозначает максимум ДН, swapdir показывает точку переключения активной антенны.

В данной работе предлагается использовать компенсационный метод [3] защиты от помех на представленной антенной решетке. Данный метод широко используется в радиолокации, а рисунок 2 кратко иллюстрирует его принцип работы. Использование данного метода предполагает прием сигна-

лов и помех в двухканальном режиме, подстраивание коэффициента K для уравнивания помехового сигнала с основного приемного канала (ПРМ1) и с вспомогательного (ПРМ2), и последующее вычитание 2 канала из 1.



а б

Рис. 1. Переключаемая антенная решетка из 6 микрополосковых антенн, а) внешний вид, б) диаграмма направленности при переключении

Данный метод имеет ограничения, в виде невозможности устранить помеху, совпадающую по направлению с целевым направлением, а также уменьшение уровня полезного сигнала при компенсации.

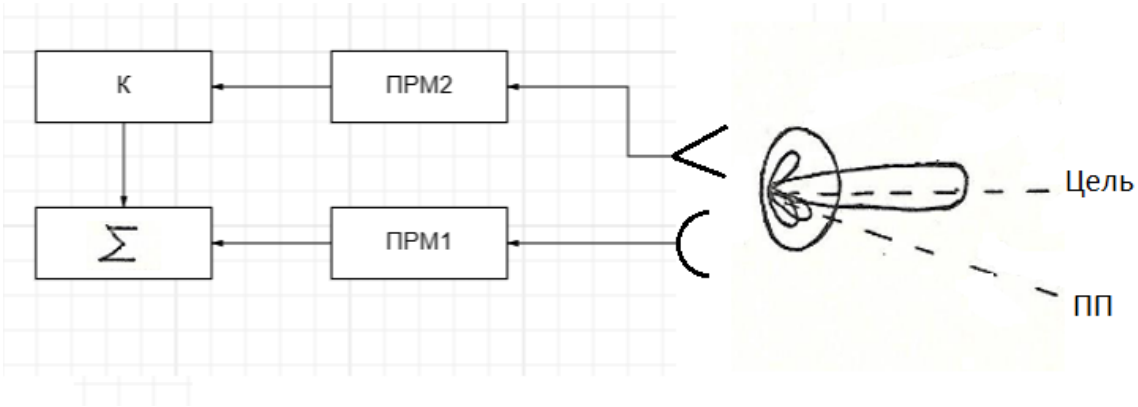


Рис. 2. Компенсационный метод защиты от помех

Для создания побочного канала приема необходима дополнительная антенна, поэтому в первом приближении был рассмотрен вариант модификации антенной системы путем добавления всенаправленного излучателя. Результаты моделирования представлены на рисунке 3. Маркер 1 показывает направление помехи, маркер 2 – результат применения компенсацион-

ного метода (снижение КУ на 3дБ), маркер 3 – изначальную ДН одного активного элемента.

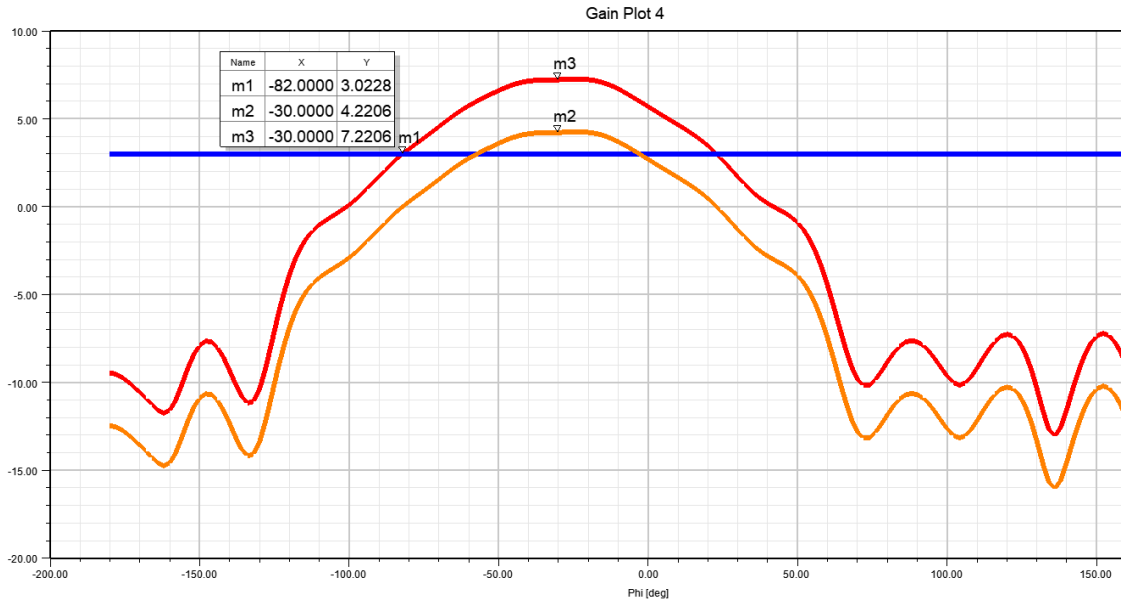


Рис. 3. Результат применения компенсационного метода при использовании дополнительной всенаправленной антенны

При дальнейшем анализе предложено решение использования в качестве вспомогательных приемных антенн соседних элементов решетки. Такое решение ослабляет ДН на меньшее значение, так как ДН соседних элементов имеют затухающий характер по направлению друг к другу, что продемонстрировано на рисунке 4.

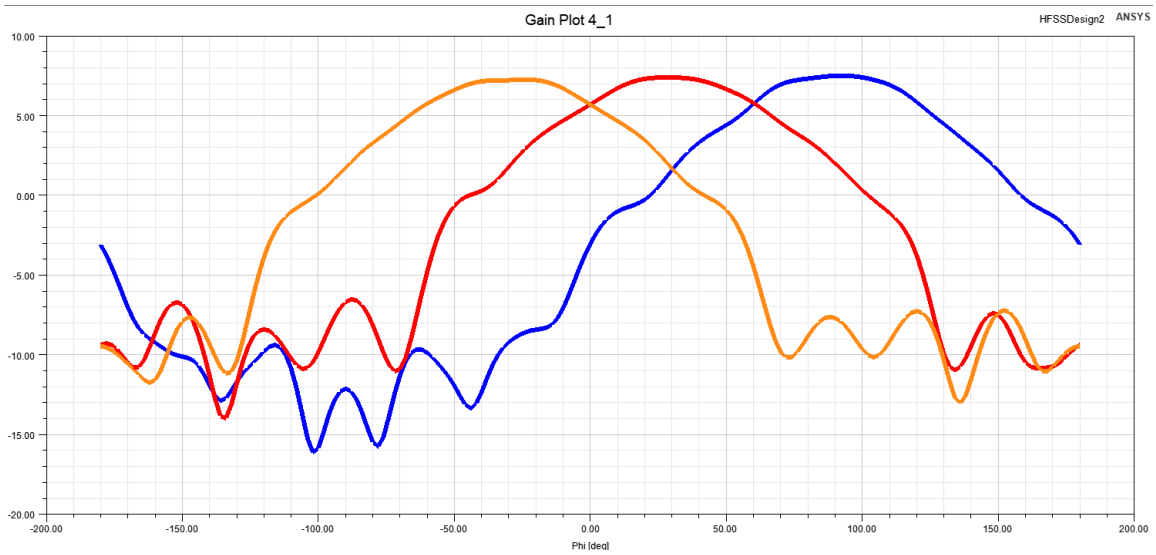
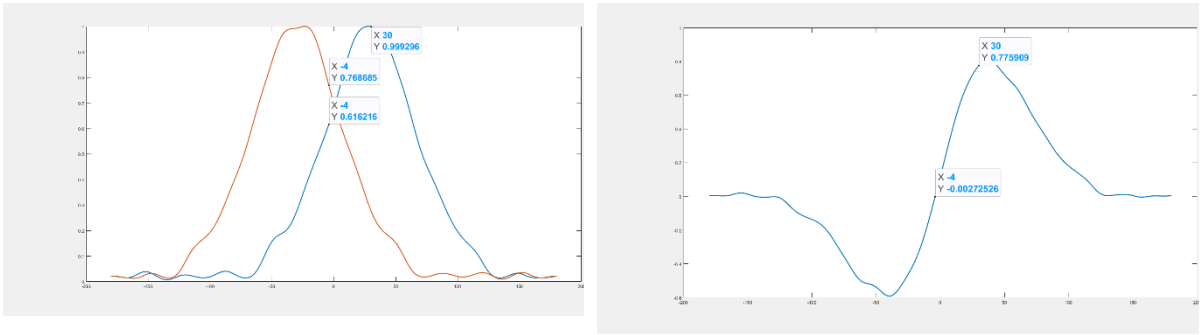


Рис. 4. Диаграммы направленности активного и его соседних элементов

В результате применения компенсационного метода ДН были пересчитаны в нормированный вид, и рассчитана эквивалентная ДН, что показано на рисунке 5.



а б

Рис. 5. а) диаграммы направленности основного и вспомогательного канала, б) эквивалентная ДН при расхождении полезного сигнала и помехи на 34°

Анализируя полученные зависимости, можно обнаружить, что снижение ДН во втором варианте составляет 23 %, при расхождении помехи и сигнала на 34°, а в первом – 50 % при расхождении 52°. Таким образом вариант использования соседних элементов переключаемой решетки в качестве вспомогательных каналов приема для компенсационного метода подавления помех является более эффективным, чем использование дополнительного всенаправленного излучателя.

В результате данной работы также получена модифицированная схема компенсационного метода, она представлена на рисунке 6.

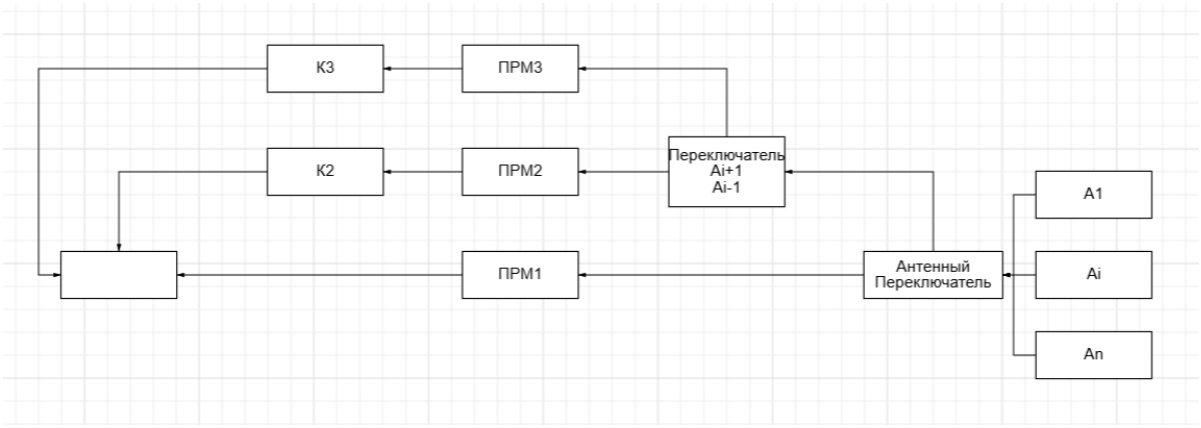


Рис. 6. Модифицированная схема компенсации помех на переключаемой антенной решетке

Список используемых источников

1. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26-29.
2. Межевов П. А., Коровин К. О. Анализ вариантов синтеза малоэлементной антенной решетки для использования в качестве бортовой антенной системы БПЛА // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 78-86.
3. Попов А. С. Пространственная селекция помех при разнесенном приеме сигналов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 1. С. 39-44.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры РТ СПбГУТ, кандидатом физико-математических наук, доцентом К. О. Коровиным.

APPLICATION OF THE COMPENSATION METHOD FOR INTERFERENCE SUPPRESSION ON UAVS WITH A SWITCHED ANTENNA ARRAY

Korovin K., Mezhevov P.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The deployment of modern communication networks based on UAVs leads to a significant increase in the number of spatially distributed radio emission sources. This complicates the interference environment and necessitates improving the noise immunity of such systems. This paper proposes the combined use of a switched antenna array and a compensation method for interference suppression. This approach allows for the compensation of interference coming from directions other than the main lobe of the active antenna's radiation pattern within the switched array.

Key words: board antenna, switched antenna array, compensation method interference suppression

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.99

СИНТЕЗ ГРЕБЕНЧАТОГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЕМКОСТЯМИ

А. Р. Кубалова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Представлена методика синтеза гребенчатого золотаревского фильтра с сосредоточенными емкостями. Использование эллиптической аппроксимации позволяет минимизировать число звеньев, габариты и вносимые потери, а применение настраиваемых конденсаторов повышает надежность и упрощает настройку. Представлен пример расчета указанного фильтра.

эллиптический фильтр, СВЧ фильтр, гребенчатая линия, единичный элемент, инвертор, полосно-пропускающий фильтр

Применение сосредоточенных емкостей позволяет создавать компактные микроволновые гребенчатые фильтры с искажением периодичности частотных характеристик, что приводит к возможному подавлению паразитных полос пропускания.

Ранее сосредоточенные емкости применялись преимущественно в фильтрах с полиномиальными характеристиками. где создавались емкости на землю, которые легко реализовывались подстроечными винтами (рис. 1а). В фильтрах с характеристикой Золотарева задача усложняется, поскольку точность задания емкостей определяет положение полюсов затухания на конечных частотах. Развитие микроминиатюрных высокодобротных конденсаторов позволило эффективно реализовывать такие структуры и уменьшить их габариты (рис. 1б). В гребенчатых эллиптических фильтрах индуктивности реализуются решеткой связанных резонаторов, а емкости (разомкнутые отрезки линий) – конденсаторами. Длину решетки можно уменьшить до $\lambda/12$ за счет расчета с помощью двойного преобразования Ричардса [1].

Частотное преобразование: $\Omega = a \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{tg}\theta_0} - \frac{\operatorname{tg}\theta_0}{\operatorname{tg}\theta} \right)$,

где: Ω – нормированная частота прототипа НЧ, a – постоянная преобразования, $tg\ \theta$ – новая частотная переменная, θ_0 – электрическая длина отрезков линий передач СВЧ структуры.

Данный метод частотного масштабирования обеспечивает переход от низкочастотной модели-прототипа (рис. 2а) к полосовой структуре (Рис. 2б). В такой реализации фильтр (ППФ) формируется на базе корокозамкнутых и разомкнутых шлейфов, чьи электрические параметры определяются через нормированные значения проводимостей g_n и G_n (Рис. 2б) [2].

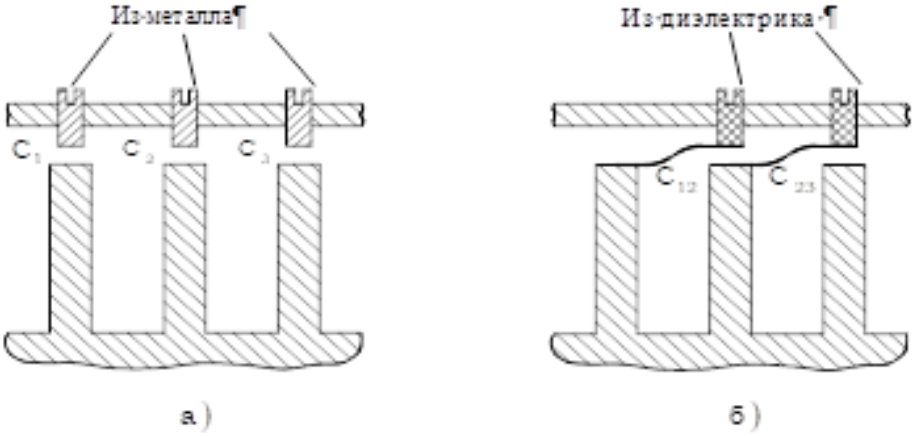


Рис. 1. Примеры реализации сосредоточенных емкостей в полиномиальных (а) и золотаревских фильтрах (б)

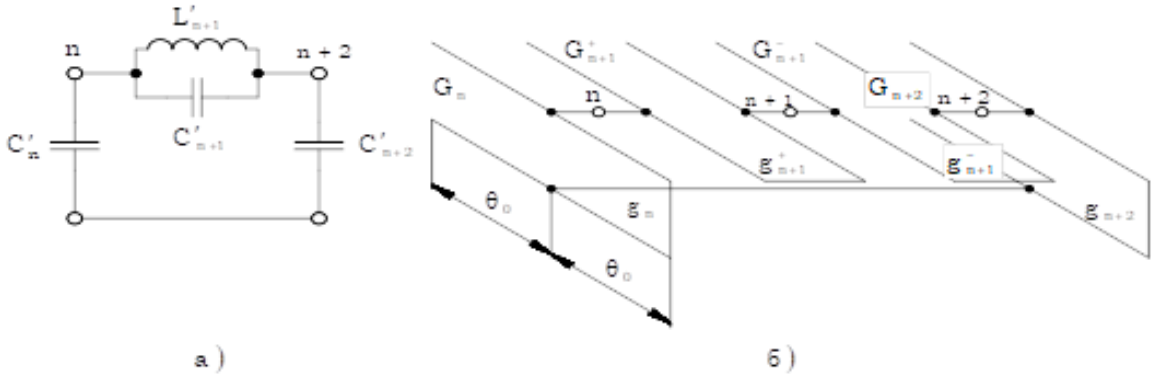


Рис. 2. Преобразование прототипа НЧ в полосно-пропускающий фильтр

В представленной модели (рис. 3) исходная цепь, содержащая комбинацию разомкнутых и короткозамкнутых шлейфов, заменяется эквивалентным контуром. В состав новой структуры входят короткозамкнутый отрезок линии и сосредоточенная емкость. Величина этой емкости вычисляется исходя из условия идентичности входных проводимостей разомкнутой линии на резонансной частоте ω_0, а также совпадения их частотных производных (параметров крутизны). Итоговые математические выражения для определения проводимости шлейфа и номинала сосредоточенной емкости имеют следующий вид

$$g'_n = g_n + m_1 \cdot G_n, \quad C_n = m_2 \cdot G_n \,(\text{пФ}),$$

где $m_1 = \frac{\theta_0 - \sin 2\theta_0}{\theta_0 + \sin 2\theta_0} \cdot \mathrm{tg}^2\theta_0$, $m_2 = \frac{2 \cdot \theta_0 \cdot \mathrm{tg}\,\theta_0}{(\theta_0 + \sin 2\theta_0) \cdot \omega_0 \cdot R} \cdot 10^{12}$.

Вычисление нормированных проводимостей шлейфов g'_n служит базой для нахождения распределенных емкостей, определяющих физическую конфигурацию системы связанных резонаторов. Ввиду того, что волновые сопротивления данной решетки (R_a *и* R_b) не эквивалентны стандартным нагрузкам, необходимо предусмотреть согласующие цепи. Традиционно используют один из двух подходов к согласованию: Точный синтез с использованием единичных элементов. На входе и выходе устройства интегрируются отрезки связанных линий (рис. 4а), не имеющие емкостной связи с «землей». Применение аппарата линейного преобразования матриц адмитанса гарантирует строгое соответствие характеристикам, но приводит к росту габаритов фильтра за счет включения в схему двух вспомогательных резонаторов. Приближенная реализация через инверторы. Данный метод оптимален для узкополосных фильтров. Его преимущества заключаются в компактности и снижении уровня диссипативных потерь, а также в возможности прецизионной настройки входных каскадов. Поскольку реализуемые импедансы резонаторной структуры привязаны к нормированному значению, стыковка с нагрузочным сопротивлением R_a производится посредством трансформирующего инвертора (рис. 5а). Физическое воплощение идеального инвертора в его строгом виде затруднено, так как требует введения в схему элементов с отрицательной емкостью (Рис. 5б). Тем не менее, для работы в ограниченной полосе частот инвертирующими характеристиками обладает Г-образное звено (рис. 5в), которое служит эффективным схемотехническим аналогом.

В расчетных формулах:

$$C_н = \frac{10^{12}}{\omega_0 \cdot \sqrt{K_0^2 - R_1^2}}\ (\text{пФ}),\ \Delta C = -\frac{\sqrt{K_0^2 - R_1^2}}{\omega_0 \cdot K_0^2} \cdot 10^{12}\ (\text{пФ})$$

Возможность физического воплощения схемы сохраняется даже при отрицательном значении ΔС. Это обусловлено спецификой схемотехники: благодаря параллельному соединению с емкостью фильтра C_1 расчетная отрицательная величина компенсируется. В итоге суммарный номинал скорректированной емкости: остается в области положительных значений, что позволяет реализовать цепь на стандартных компонентах.

Формула скорректированной емкости: $(C_{1.})_k = C_{1.} + \Delta C$.

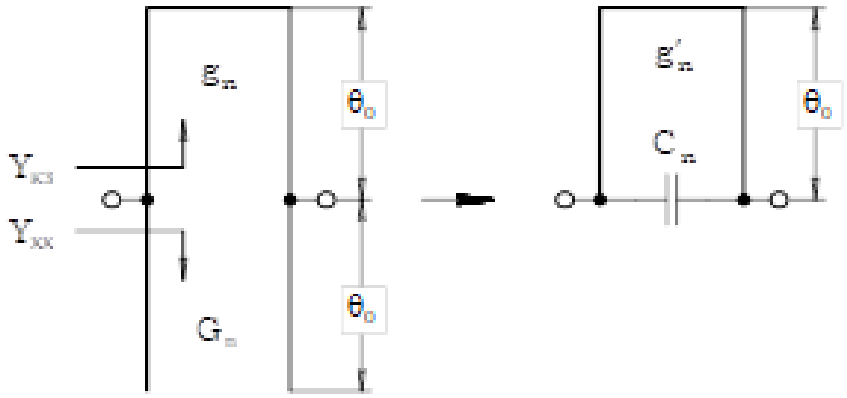


Рис. 3. Эквивалентное преобразование контура

Синтезированный фильтр обладает заданными параметрами селективности: при средней частоте 136,6 МГц и полосе 5 МГц; гарантируется подавление помех на уровне 60 дБ при отклонении на ±7 МГц. Вносимое затухание в рабочем диапазоне не превышает 1,5 дБ. Эксплуатационные характеристики включают работу на нагрузку 50 Ом с коэффициентом отражения (по КСВ) менее 1,2. Конструктивное исполнение предполагает воздушную среду в качестве основного диэлектрика.

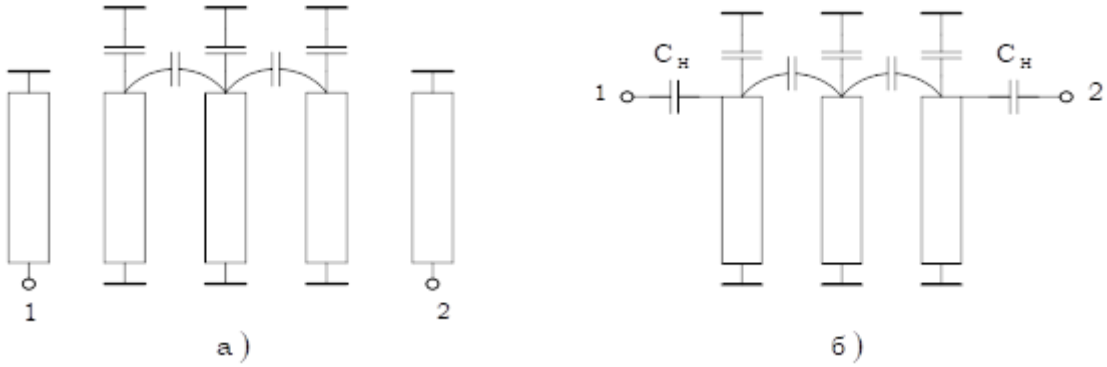


Рис. 4. Два способа согласования фильтра с нагрузками:
а) единичными элементами, б) инверторами

Расчет включает выбор электрической длины резонаторов $\theta_0 = \pi/6$, определение коэффициента частотного преобразования, выбор ФПНЧ С05-04-22, вычисление нормированных проводимостей разомкнутых и короткозамкнутых линий ППФ, формирование матриц сосредоточенных емкостей и статических распределенных емкостей, определение коэффициентов трансформации, расчет зазоров между резонаторами и геометрических размеров конструкции.

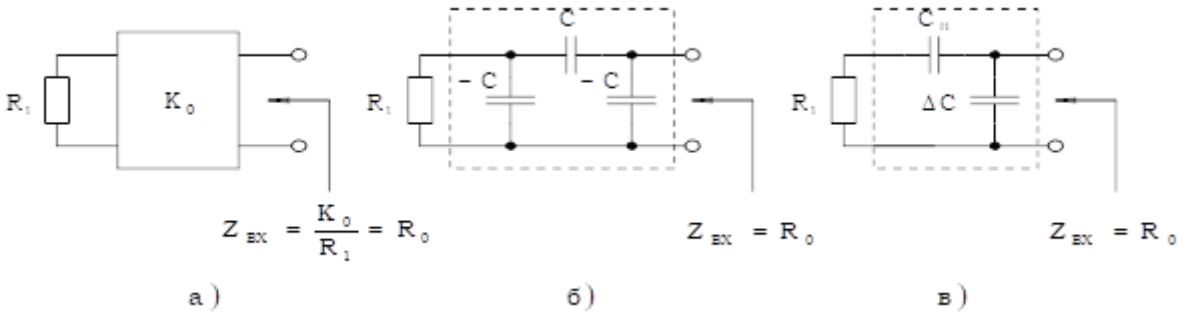


Рис. 5. Согласование фильтра с нагрузками с помощью инвертора:
а) включение сопротивления через инвертор; б) реализация инвертора;
в) Г-образное звено

Был рассчитан гребенчатый фильтр с сосредоточенными емкостями, при использовании прототипа из пяти элементов с коэффициентом отражения 10 % и с уровнем затухания в полосе задержки в 69,2 дБ. Ширина полосы была выбрана 5 МГц на частоте 136,6 МГц, чтобы получить как минимальные потери, так и уменьшение пульсации затухания в пределах 2,5 МГц от f_0 . Электрическая длина индуктивных резонаторов равняется 183 мм. Значения сосредоточенных емкостей попадают в диапазон от 8 до 36 пФ, и могут быть реализованы при помощи промышленных настраиваемых конденсаторов. Представленная архитектура (рис. 6) иллюстрирует преимущества фильтров гребенчатого типа для работы на низких СВЧ-частотах. Сокращение линейных размеров резонаторов до $\lambda/12$ позволяет интегрировать устройство в ограниченный объем, не жертвуя его селективностью и добротностью

В статье рассмотрен синтез эллиптического гребенчатого фильтра ссосредоточенными емкостями. Применение эллиптической характеристики позволяет сократить число звеньев, уменьшить потери и габариты устройства. Использование настраиваемых конденсаторов упрощает настройку и повышает устойчивость конструкции к неблагоприятным условиям окружающей среды. Схемотехническое исполнение данного фильтра отличается трудоемкостью и труднореализуемо в сегменте микроволновой техники. Несмотря на высокие функциональные возможности, производство эллиптических структур на СВЧ требует решения сложных инженерных задач, связанных с точностью допусков и топологией, что требует дальнейших исследований по упрощению конструкций и повышению технологичности.

W_1=12,64мм	W_2=10,42мм	W_3=10,58мм	W_4=8,704мм	W_5=12,71мм
S_{12}=4мм		S_{23}=7,8мм	S_{34}=3,6мм	S_{45}=3мм

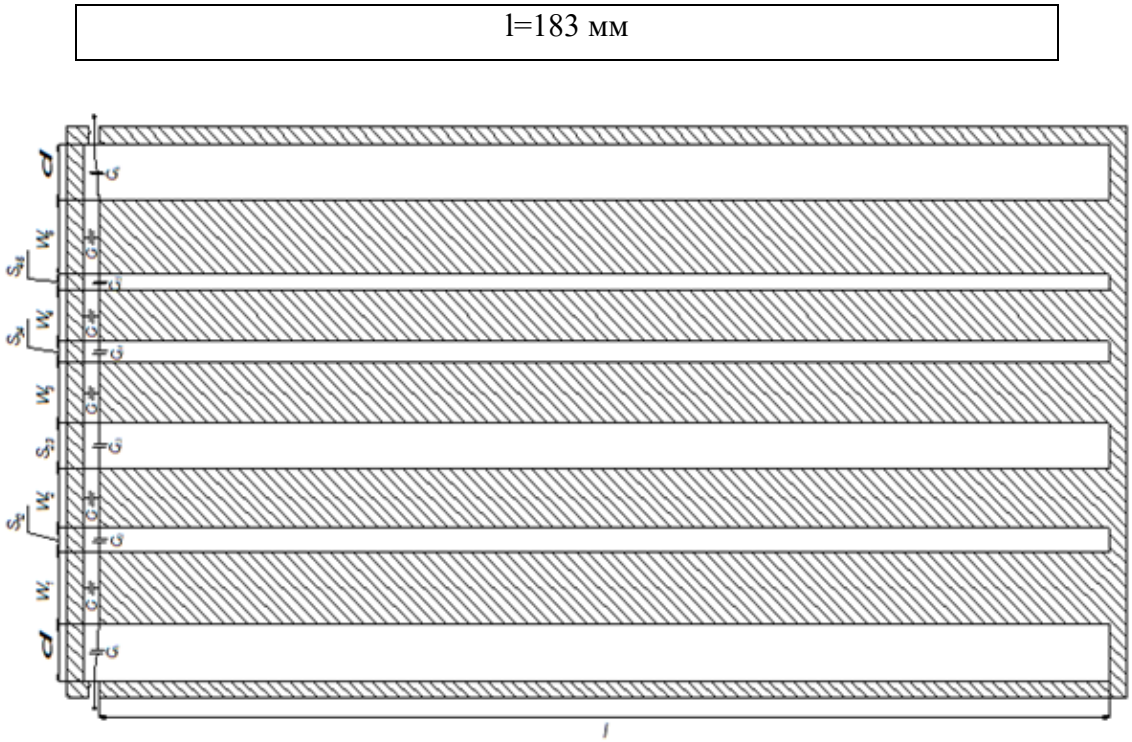


Рис. 6. Топология ЭФ

Список используемых источников

1. Кубалова А. Р., Томашевич С. В. Анализ и синтез микроволновых эллиптических фильтров. СПб.: Издательство СПбГУТ, 2013. 359 с.

2. Кубалова А. Р., Томашевич С. В. Синтез микроволнового эллиптического фильтра с четвертьволновыми инверторами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. № 2. С. 59–67.

SYNTHESIS OF A COMBLINE ELLIPTIC FILTER WITH LUMPED CAPACITANCES

Kubalova A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

A synthesis methodology for a Zolotarev combline filter with lumped capacitances is presented. The use of elliptic approximation allows for minimizing the number of sections, physical dimensions, and insertion loss, while the application of tunable capacitors increases reliability and simplifies the tuning process. A design example of the specified filter is provided.

Key words: elliptic filter, microwave filter, combline, unit element, inverter, bandpass filter

УДК 621.391.823
ГРНТИ 47.05.15

ПОЭТАПНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В ПОЛУМОСТОВЫХ ДРАЙВЕРАХ ПРИ РАБОТЕ С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

А. И. Кучерявый, А. А. Ухов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Обеспечение ЭМС полумостовых драйверов с индуктивной нагрузкой – нетривиальная, но частая задача. В классической литературе много общих слов, но мало практических примеров. В статье на примере управления коллекторным двигателем показан пошаговый процесс подавления электромагнитных помех. Каждый этап сопровождается результатами измерений. В конце приведен сводный график, отражающий влияние каждого решения на уровень помех.

подавление помех, полумостовой драйвер, индуктивная нагрузка

Цель данной работы – улучшение электромагнитной обстановки (ЭМО) в полумостовых драйверах. В рассматриваемом устройстве плата содержит два драйвера для управления коллекторным двигателем. Схема драйвера построена на базе отечественной микросхемы К1347АП4Р и приведена на рисунке 1.

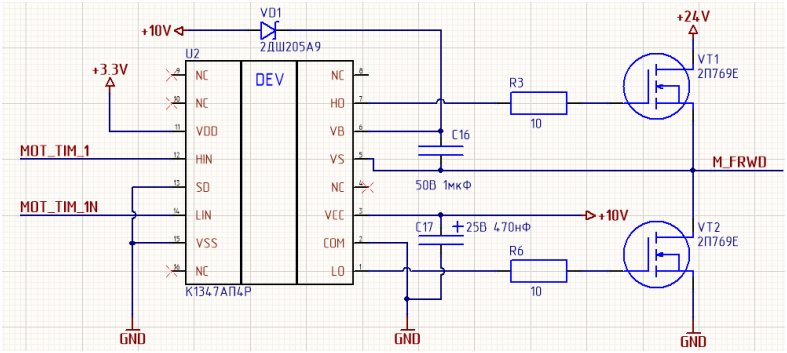
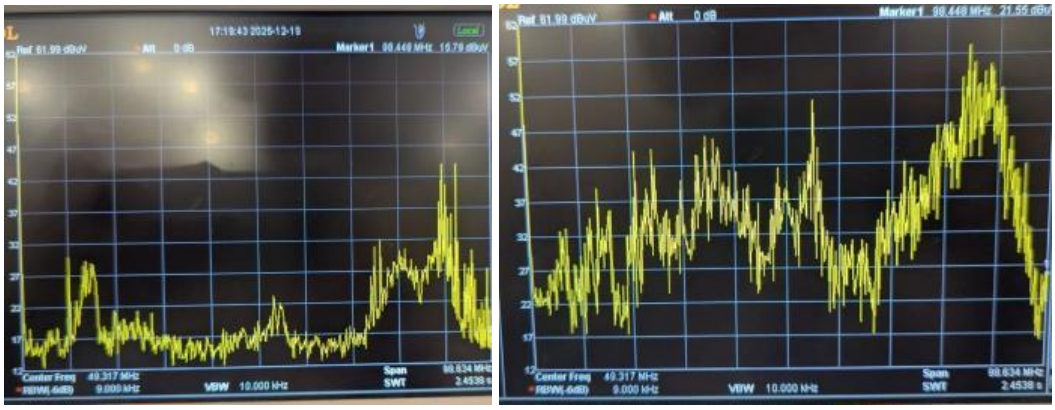


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема полумостового драйвера на микросхеме К1347АП4Р

На рисунке 2 приведены спектральные картины, полученные при работе устройства с двумя типами нагрузки: резистивной (нагреватель) и индуктивной (коллекторный двигатель).

Уровень электромагнитных помех (ЭМП) увеличился на некоторых частотах более чем на 40 дБмкВ. Индуктивный характер нагрузки является классическим источником всплесков ЭМП из-за накопления энергии в магнитном поле [1].



а) б)

Рис. 2. Спектральные картины при работе драйвера: а) на резистивную нагрузку; б) на индуктивную нагрузку

Для улучшения спектральной картины были рассчитаны и установлены RC-снабберы, рисунок 3.

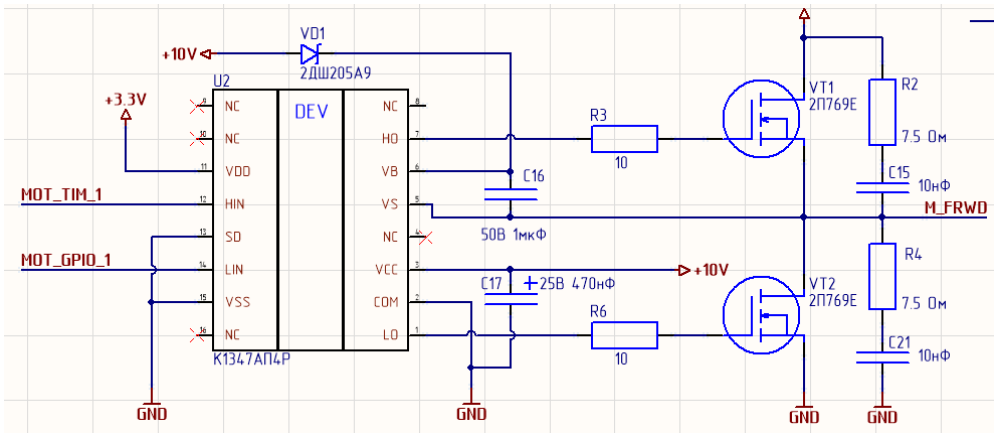
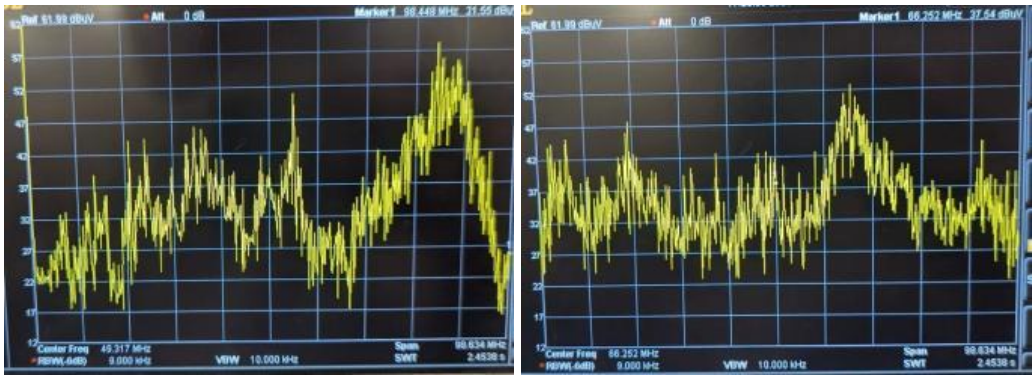


Рис. 3. Принципиальная схема полумостового драйвера с RC-снабберами

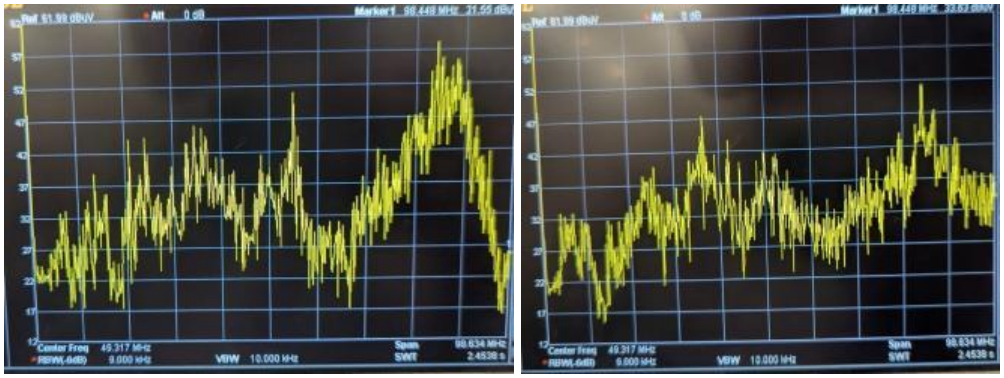
Изменение спектральной картины после установки снабберов показано на рисунке 4.



а) б)

Рис. 4. Спектральные картины: а) без снабберов; б) со снабберами

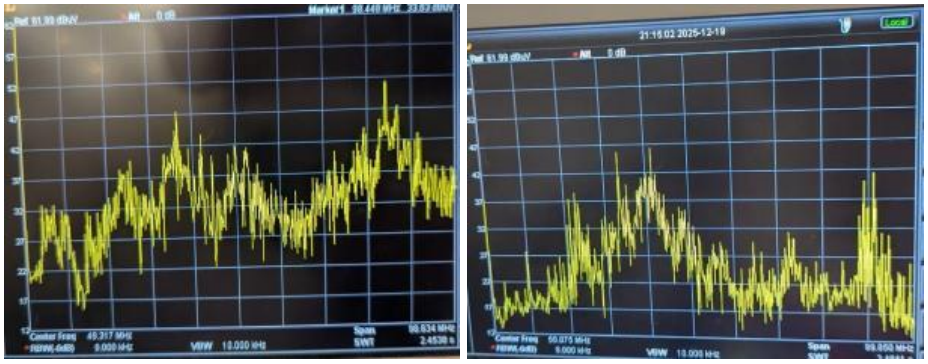
Следующим шагом были установлены конденсаторы по питанию: два электролитических конденсатора по 270 мкФ и четыре керамических по 100 нФ. Такая комбинация необходима для обеспечения низкого импеданса на разных частотах: электролиты эффективны в низкочастотной области, а керамика – в высокочастотной, что является стандартной практикой построения цепей питания [2]. Изменение спектральной картины показано на рисунке 5.



а) б)

Рис. 5. Спектральные картины: а) без конденсаторов; б) с конденсаторами

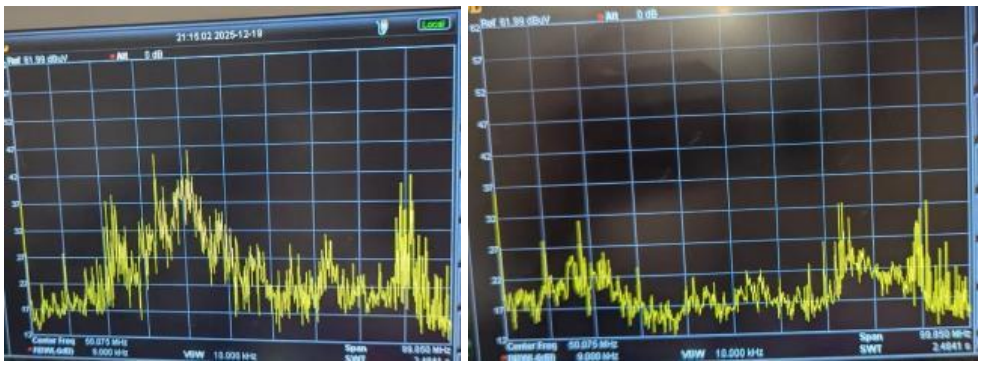
Для дальнейшего подавления ЭМП было выполнено экранирование кабеля питания и корпуса двигателя с помощью медной луженой плетенки ПМЛ. Изменение спектральной картины показано на рисунке 6.



а) б)

Рис. 6. Спектральные картины: а) без экранирования; б) с экранированием

Финальным шагом в подавлении ЭМП стала установка керамических конденсаторов между выводами коллекторного двигателя и его корпусом. Результат показан на рисунке 7. Это решение направлено на подавление синфазной помехи, создавая путь для высокочастотных токов минуя длинные соединительные проводники [3].



а) б)

Рис. 7. Спектральные картины: а) до установки конденсаторов; б) после установки конденсаторов между выводами двигателя и его корпусом

На рисунке 8 приведен сводный график, отражающий последовательное улучшение спектральной картины после реализации всех описанных этапов.

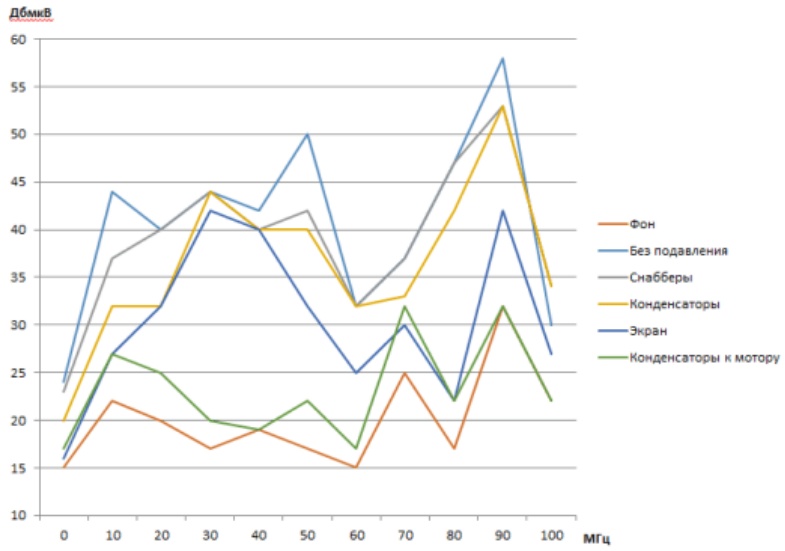


Рис. 8. Изменение спектральной картины в результате применения помехоподавляющих решений

Каждое последующее решение последовательно снижало уровень ЭМП. Наибольший вклад внесли экранирование кабеля и корпуса, а также установка керамических конденсаторов между выводами двигателя и его корпусом. Снабберы и конденсаторы по питанию тоже улучшили спектральную картину, и в случаях, когда доступ к двигателю ограничен, их применение не только эффективно, но и остается единственно возможным.

Список используемых источников

1. Кечиев Л. Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры: инженерное пособие / Л. Н. Кечиев. М.: Грифон, 2019. 720 с.: ил. ISBN 978-5-98862-472-7.
2. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование: научное издание / Д. Н. Шапиро. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 120 с. ISBN 978-5-91559-049-5.
3. Ефанов В. И., Тихомиров А. А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: учебное пособие / В. И. Ефанов, А. А. Тихомиров. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. 228 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры СПбГЭТУ, доктором технических наук, профессором А. А. Уховым.

STEP-BY-STEP SUPPRESSION OF NOISE IN HALF-BRIDGE DRIVERS WITH INDUCTIVE LOAD

Kucheryavyy A. Uhov A.
St. Petersburg State Electrotechnical University named after V. I. Ulyanov (Lenin)

Ensuring EMC of half-bridge drivers with inductive load is a nontrivial but common task. Classical literature provides many general recommendations but few practical examples. This article presents a step-by-step process of electromagnetic interference suppression using a half-bridge driver controlling a brushed DC motor. Each stage is accompanied by measurement results. A summary graph is provided at the end, showing the impact of each solution on the noise level.

Key words: noise suppression, half-bridge driver, inductive load, EMC, brushed DC motor, snubber, shielding

УДК 629.73
ГРНТИ 47.49.33

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С БПЛА

А. Н. Ликонцев, А. Д. Уроков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко распространены и находят применение в решении задач как общего, так и специального назначений. В данной статье рассматриваются существующие каналы управления и передачи данных между БПЛА и пунктом управления, их технические особенности. Особое внимание уделяется конструктивным особенностям распространенных антенных систем БПЛА и структуре систем управления. Помимо этого, приводятся рассуждения о потенциальной применимости технологии LoRa в системах БПЛА

БПЛА, антенные системы, С2, линия связи, LoRa

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) на сегодняшний день решают широкий спектр задач – от военных до гражданских, таких как мониторинг местности, навигация, телеметрия и телекоммуникации. Анализ, проведенный ассоциацией «Аэронекст» в 2023 году, показывает, что на единицу воздушного пространства приходится до 20 БПЛА [1]. Столь интенсивное использование технологий делает критически важным развитие аппаратуры передачи данных и поддержания устойчивого радиоконтакта между наземными пунктами управления (НПУ) и летательными аппаратами.

Основой функционирования БПЛА является радиоканал, обеспечивающий связь между летательным аппаратом и НПУ. Именно по этому каналу передаются команды управления, телеметрия, видеоизображение и прочая информация.

Ключевыми характеристиками, определяющими эффективность БПЛА, являются стабильность, пропускная способность и устойчивость линии связи к помехам. Радиосвязь требует компромисса между такими параметрами, как дальность действия, скорость передачи данных и защищенность сигнала. От уровня развития этих технологий зависят возможности аппаратов в задачах разведки, логистике и мониторинге.

Без устойчивой связи с оператором или автономной системой управления полет невозможен. Потеря контакта делает дрон неуправляемым, что влечет за собой риск аварии или потери оборудования.

В большинстве случаев управление БПЛА осуществляется напрямую с использованием электрического или оптического кабеля (привязанные), по прямому каналу между БПЛА и НПУ в пределах прямой видимости (LOS) или посредством спутниковой связи за пределами прямой видимости (BLOS). На рис. 1 схематически изображены упомянутые каналы связи.



Рис. 1. Иллюстрация каналов связи BLOS и LOS

Привязанные дроны не используют радиоканалы и основные их преимущества происходят непосредственно из использования кабеля для передачи данных – широкая полоса и высокая скорость передачи данных (оптические кабели могут достигать скорости 10-40 Гбит/с), неуязвимость к направленным и непреднамеренным помехам, низкая задержка [2]. Современные системы используют кабели длиной 5-20 км, однако разрабатываются и системы достигающие 50 км. Несмотря на существенные преимущества, привязанные дроны обладают рядом недостатков – дальность полета ограничена длиной кабеля, который в свою очередь может запутаться или оборваться, повышенная нагрузка и ограниченная маневренность. Такие БПЛА раньше использовались в основном в гражданских условиях, однако введенные РФ с 2024 года, активно используются и для выполнения военных задач.

Остальные виды дронов используют радиоканалы для передачи данных между летательным аппаратом и НПУ. Использование беспроводной линии связи обеспечивает меньшую скорость передачи данных, ограниченную шириной используемой полосы, и увеличенные задержки. С другой стороны, такие дроны более маневренны, быстры в развертывании и достигают большей дальности полета за счет отсутствия физического кабеля. Наиболее распространенной частотой для организации каналов связи

с БПЛА является 2.4 ГГц, однако применение находят и более низкие частоты – 27 МГц, 72 МГц, 433МГц, 900 МГц и 1.3 ГГц. Организациями ИКАО и МСЭ были специально выделены следующие частоты [3] для передачи команд управления и другой информации:

– 0.2 – 1.5 МГц;
– 2 – 30 МГц;
– 108 – 118 МГц;
– 118 – 137 МГц;
– 220 – 400 МГц;
– 960 – 1215 МГц;
– 5030.4 – 5150 МГц.

В РФ решением ГКРЧ от 27 сентября 2023 года для БПЛА были выделены только две полосы: 390.125 – 398.875 МГц (воздушная подвижная служба) и 5030-5091 МГц (воздушная подвижная спутниковая (R) и воздушная подвижная (R) службы). Выделение частот для обеспечения безопасности и единообразия в управлении и передачи данных дронов является одной из главных проблем в области развития БПЛА.

ИКАО выделяет до 5 возможных линий связи между БПЛА и НПУ, наиболее важная из которых – это линия управления (command and control link – C2). Каналы C2 обычно выбираются узкополосными, поскольку команды управления не требуют высокой скорости передачи данных, и для обеспечения большей стабильности канала связи. Для обеспечения канала C2 используются каналы ОВЧ и УВЧ диапазонов, службы сотовой связи 2G, 3G и 5G, и для дронов низкой дальности могут использоваться технологии Bluetooth или Wi-Fi. МСЭ выделяет ряд частот для канала C2, наиболее распространенные из которых:

– наземная связь: 960 – 1164 МГц, 5030 – 5091 МГц;
– спутниковая связь: 5030 – 5091 МГц.

Связь между БПЛА и НПУ обеспечивается с помощью бортовых антенных систем. Выбор между всенаправленными и узконаправленными системами зависит от условий полета и решаемых задач. Всенаправленные системы являются более простым решением и обеспечивают связь с пунктом управления при любом положении дрона в пространстве внутри рабочей области. Узконаправленные системы позволяют добиться большей дальности полета и более высокого уровня сигнала, однако уступают всенаправленным системам по габаритным параметрам и требуют наличия механических или электрических систем отслеживания НПУ.

Основные требования к бортовым антеннам [4]:

– обеспечение согласования (коэффициент отражения $S_{11} < -10$дБ);

– малый вес, компактность и обтекаемая форма;
– диаграмма направленности (ДН) должна быть ориентирована в сторону НПУ (нижняя полусфера) или в сторону спутника (верхняя полусфера) в зависимости от типа управления.

Наиболее широкое применение в БПЛА находят следующие типы антенн:

– штыревые – простые и дешевые; для улучшения аэродинамики часто применяют укороченные варианты с емкостной нагрузкой и защитные обтекатели;
– микрополосковые – отличаются минимальной высотой и возможностью удобного размещения на корпусе (конформные);
– спиральные – возможность работать с круговой поляризацией, что особенно выгодно при управлении БПЛА посредством спутника; могут быть как узкополосными, так и широкополосными;
– антенные решетки – обладают узкой ДН и высоким коэффициентом усиления (КУ).

Современные системы включают методы расширения спектра (например, ППРЧ) для повышения скрытности и помехозащищенности, адаптируясь под различные сценарии.

Для повышения дальности и времени работы БПЛА возможно использование технологии LoRa – запатентованная технология, основанная на применении линейной частотной модуляции для расширения спектра. При низком энергопотреблении, LoRa может достигать скорость передачи данных 0.3 – 50 кб/с и дальность связи 15 – 20 км (2 – 5 км в городских условиях). Сравнительно низкая скорость передачи данных обеспечивает более надежную связь, что особенно важно при передаче данных на большие расстояния. Модули LoRa также отличаются доступностью и низкой ценой.

Как и большая часть систем БПЛА, технология LoRa использует нелицензируемые частоты для обеспечения канала связи, что может упростить интеграцию в системы дронов. Так же LoRa применяется в радиосетях Meshtastic для организации децентрализованных сетей обмена данных, что может найти применение в технологии роя БПЛА.

На сегодняшний день проводятся исследования о применении LoRa в сетях [5], в частности интернета вещей, и регуляции трафика посредством БПЛА, однако широкого применения еще не было.

Основными проблемами в области развития БПЛА представляются вопросы выделения диапазонов частот для передачи данных и управления БПЛА, разработка компактных антенных систем с высоким КУ и помехозащищенных алгоритмов передачи данных. Помимо этого, внедрение техно-

логии LoRa в системы БПЛА является перспективным направлением для создания как сетей связи, так и энергоэффективных систем БПЛА.

Список используемых источников

1. Аналитический отчет по исследованию российского гражданского рынка беспилотных авиационных систем (БАС) // Ассоциация «Аэронекст» [Электронный ресурс] – URL: https://aeronext.aero/UserFiles/ContentFiles/2023-12-29_16-40-56_ %D0 %9E %D1 %82 %D1 %87 %D0 %B5 %D1 %82_ %D0 %A0 %D1 %8B %D0 %BD %D0 %BE %D0 %BA %20 %D0 %91 %D0 %90 %D0 %A1_2023_8.pdf (дата обращения: 23.02.2026).

2. Fattori, F., Cocuzza, S. Tethered Drones: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Applications. // Drones 9, no. 6 (2025). p. 425.

3. Аникин А. Л., Резник Б. И., Евстигнеев Ф. В., Карнаухов Д. В., Мейлихов Е. Е. Анализ требований к технологиям интеграции беспилотных авиационных систем в воздушное пространство Российской Федерации // АНО Центр «Аэронет». 2019.

4. Андрющенко М. С., Голик А. М., Сахнов С. А., Терешин С. Н. Антенные системы беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки 5, 230-236.

5. Ghazali, Mohamad Hazwan Mohd, Kelvin Teoh, Wan Rahiman. A systematic review of real-time deployments of UAV-based LoRa communication network // IEEE Access 9. PP. 124817-124830.

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедры РТ СПбГУТ, кандидатом физико-математических наук, доцентом К. О. Коровиным.

ANALYSIS OF OPTIONS FOR CONSTRUCTING UAV CONTROL AND DATA TRANSMISSION CHANNELS

Likontzev A., Urokov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) are widespread and are used to solve both general and special-purpose tasks. This article examines the existing control and data transmission channels between a UAV and its control station, along with their technical features. Special attention is paid to the design characteristics of common UAV antenna systems and the structure of their control systems. In addition, considerations regarding the potential applicability of LoRa technology in UAV systems are presented.

Key words: UAVs, antenna systems, C2, communication link, LoRa

УДК 621.39
ГРНТИ 49.33.29

ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТНЫХ СТРУКТУР

А. Г. Любимов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящей работе предлагается к рассмотрению подход к автоматизации управления транспортными сетями различного назначения, в том числе глобальных вычислительных сетей, в парадигме перспективной технологии программно-конфигурируемых сетей. Вводится понятие инвариантной структуры на физическом уровне передачи данных. Показано, что транспортной сети связи с целочисленными значениями пропускной способности линий можно поставить в соответствие конечный набор инвариантных структур. Предлагается дополнить технологию программно-конфигурируемой сети в плоскости управления коммутацией потоков на сетевых устройствах коммутацией каналов на уровне физической сети на основе инвариантных структур.

программно-конфигурируемые сети, управление коммутацией потоков и каналов, инвариантные структуры физической сети

В традиционном исполнении современные вычислительные сети представляют собой полностью распределенную структуру. Процессы управления и процессы передачи данных неотделимы друг от друга и реализованы в каждом сетевом устройстве (коммутатор, маршрутизатор и т.п.). Программное обеспечение сетевого устройства выполняет необходимый анализ пакетов и определяет порядок их передачи. При наличии протоколов динамической маршрутизации таких как: OSPF (*Open Shortest Path First*), BGP (*Border Gateway Protocol и* т.п.), обеспечивающих взаимодействие сетевых устройств, каждое из них функционирует достаточно автономно. Сетевые устройства независимо друг от друга собирают информацию о состоянии сети, создают и обновляют свои таблицы коммутации и маршрутизации. Любое изменение топологии и структуры физической сети (*Underlay*) вызывает мощный всплеск обмена служебными пакетами протоколов маршрутизации. При этом установившийся режим сети (схождение) может составлять минуты, что недопустимо для ряда сетевых сервисов. Кроме того, снижение пропускной способности каналов и трактов на отдельных участках физической сети может создать критические условия для туннелирования наложенных (виртуальных) сетей (*Overlay*)), работающих поверх физической сети.

В настоящей работе предлагается к рассмотрению подход к автоматизации управления транспортными сетями различного назначения, в том

числе глобальных вычислительных сетей, в парадигме перспективной технологии программно-конфигурируемых сетей [1,2]. Программно-конфигурируемые сети (*Software-Defined Networks, SDN*) – это подход к управлению сетями, который позволяет программно настраивать и реконфигурировать потоки в транспортной сети в реальных условиях функционирования для повышения их производительности. Это подход к управлению сетью, когда изменения на сети выполняются не администратором, а программой. Базовые идеи *SDN* были сформулированы специалистами университетов Стэнфорда и Беркли еще в 2006 г.

SDN – программно-управляемая сеть, в которой управление сетевыми устройствами (коммутаторами, маршрутизаторами и т.п.) полностью осуществляется специальным устройством управления (контроллером). При этом сетевые устройства освобождаются от сбора информации для обновления таблиц маршрутизации, а выполняют инструкции контроллера по управлению потоками. Такой подход основан на физическом разделении уровня управления сетью от уровня передачи данных.

Архитектура сети *SDN*, в общем виде, состоит из трех уровней (рис. 1).

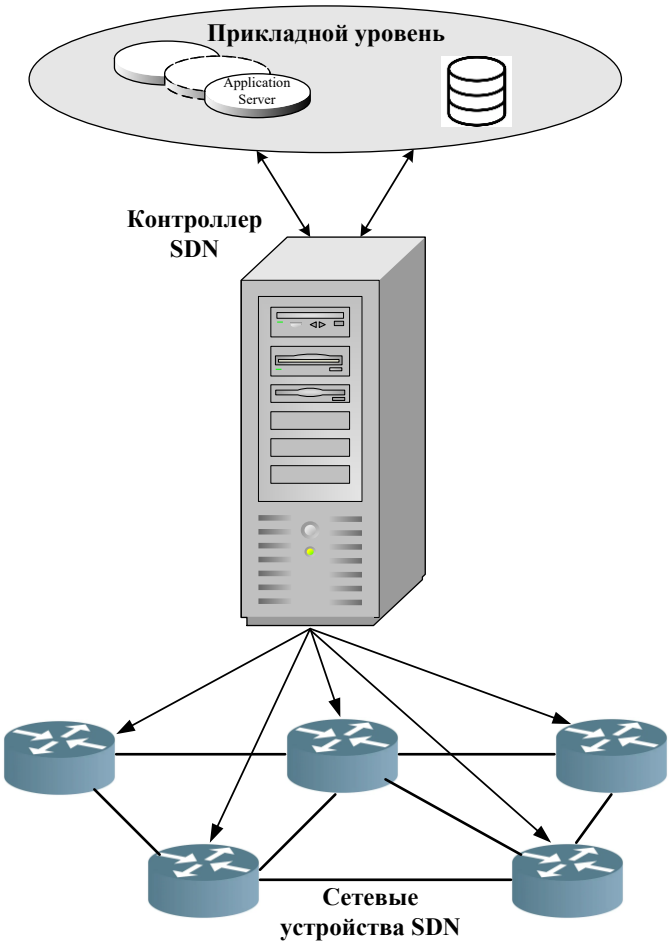


Рис. 1. Архитектура сети *SDN*

Прикладной уровень представляет собой интеллектуальную составляющую *SDN*, содержащую сервисные приложения, системы безопасности, балансировщики нагрузки, системы мониторинга и аналитики элементов физической сети. Приложения разрабатывают инструкции для контроллера, а последний реализует программное управление сетевыми устройствами передачи данных.

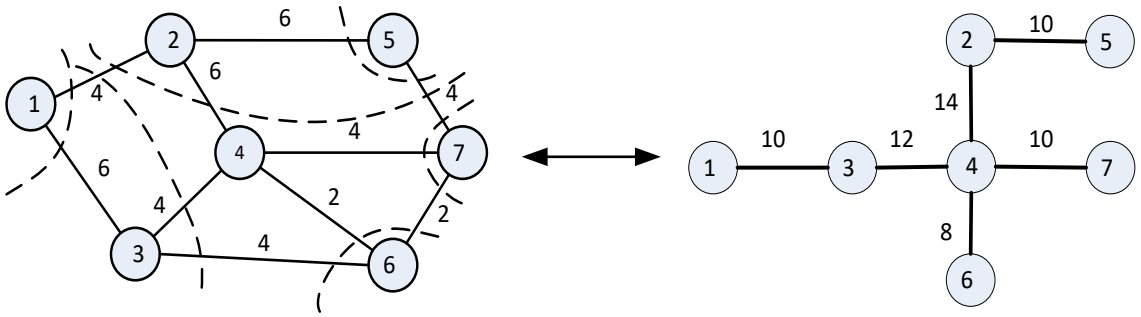
Взаимодействие контроллера *SDN* с сетевыми устройствами осуществляется по протоколу *OpenFlow.* Стандарт *OpenFlow* в настоящее время принят большинством производителей сетевого оборудования. Сетевые устройства *SDN*, поддерживающие протокол *OpenFlow*, работают не с пакетами, а с потоками данных. Вместо таблиц коммутации пакетов в сетевом устройстве для передачи данных используется таблицы потоков. Каждый отдельный поток имеет свой приоритет. Приоритет потока определяется его позицией в таблице потоков.

Технология программно-конфигурируемых сетей с централизованным управлением потоками рассматривает физическую сеть как простую «битовую трубу» определенной структуры и топологии. При всем том, что в этой «битовой трубе» агрегируются потоки данных всех сервисов прикладного уровня, и структура физической сети определяет предельные возможности по передаче потоков данных на направлениях связи. Любые изменения в структуре физической сети неизбежно приведут к изменению (нарушению) действующей схемы потоков.

Наряду с решениями по централизованному конфигурированию потоков в сети *SDN* на сетевых устройствах предлагается выполнять реконфигурацию структуры сети на уровне типовых каналов и трактов передачи данных. В работе рассматривается подход к реконфигурации физической сети с использованием инвариантных структур.

При рассмотрении свойства инвариантности некоторой структуры воспользуемся понятием потоко-эквивалентной сети. Потоко-эквивалентными называются такие две сети, которые имеют равные величины максимальных потоков между некоторым множеством узлов [3]. Доказано также, что если множество значений пропускной способности линий потоко-эквивалентной сети является множеством значений максимальных потоков, то такая структура сети, в силу известной теоремы Форда-Фалкерсона о максимальном потоке и минимальном разрезе (сечении) [4], реализуема в виде дерева.

На рисунке 2 представлены структура физической сети с целочисленными значениями пропускной способности линий в виде неориентированного графа $G = \{V,B\}$, где $V = \{v_{ij}\}$ – множество сетевых узлов, $B = \{b_{ij}\}$ – множество линий связи, и ее потоко-эквивалентная сеть в виде дерева минимальных сечений (разрезов). Каждой линии физической сети поставлено в соответствие значение пропускной способности $c_{ij} = c(b_{ij})$.



а) граф исходной физической сети б) дерево минимальных сечений

Рис. 2. Потоко-эквивалентные сети

На дереве минимальных сечений (рис. 2б) каждое ребро из множества $\{b_{ij}\}$, например b_{34}, представляет собой множество ребер $\{b_{12},b_{34},b_{36}\}$ исходной сети, входящих в сечение. При этом значение пропускной способности $c(b_{34}) = 12$ определяет максимальное значение потока, который может обеспечить физическая сеть с данной структурой между множеством узлов $\{a_1,a_3\}$ и множеством узлов $\{a_2,a_4,a_5,a_6,a_7\}$. Аналогичным образом можно получить полную характеристику физической сети по передаче потоков в любой комбинации маршрутов потоков между сетевыми узлами.

Учитывая особое свойство потоко-эквивалентной сети в виде дерева минимальных сечений, можно сформулировать следующее условие относительно инвариантности структуры физической сети.

Структура физической сети является инвариантной по пропускной способности относительно любого плана распределения потоков, если для потоко-эквивалентной сети множество минимальных сечений имеет одинаковое значение максимального потока.

Можно показать, что приведенное условие инвариантности является исключительно структурной характеристикой физической сети. Значение максимального потока в такой структуре может быть любым и определяется значениями пропускной способности линий, но всегда остается неизменным при любом плане централизованного распределения потоков. Про-

стые типовые структуры, для которых выполняются условия инвариантности, приведены на рисунке 3.

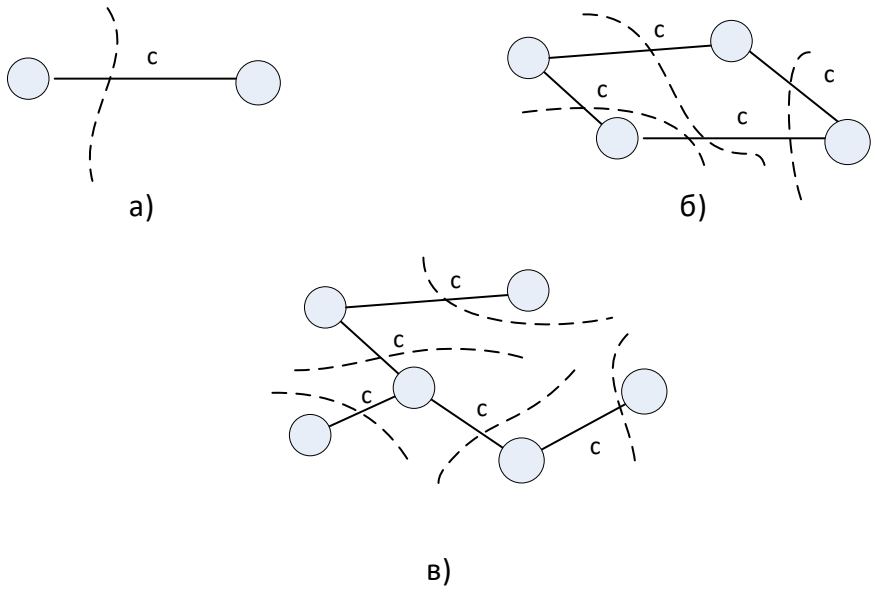


Рис. 3. Типовые инвариантные структуры

Линейная структура (рис. 3а) представляет собой простой или составной канал (сетевой тракт) и является инвариантной относительно смежных узлов. Циклическая (кольцевая) структура (рис. 3б) широко применяется на первичных и вторичных (наложенных) сетях различного назначения. В контексте свойства инвариантности структура обладает постоянной пропускной способностью для всех возможных комбинаций потоков. Древовидная структура (рис. 3в) также становится инвариантной при равной пропускной способности всех линий.

Можно показать, что любую физическую сеть с целочисленными значениями пропускной способности линий можно представить в виде конечного множества инвариантных структур с постоянными значениями максимальных потоков. В общем случае для физической сети может иметь место множество вариантов декомпозиции. На рисунке 4 приведен вариант декомпозиции физической сети с выделением инвариантных структур при доминировании узла 4.

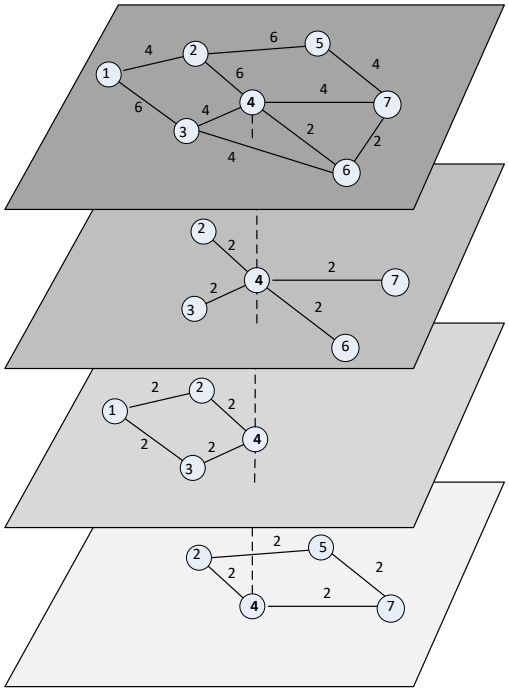


Рис. 4. Вариант декомпозиции физической сети

В результате централизованной декомпозиции физической сети *SDN* для каждого сетевого устройства можно организовать коммутируемую инфраструктуру для раздельной передачи потоков различных маршрутов и категорий.

В работе показана возможность и целесообразность применения перспективных программно-аппаратных средств автоматизации управления каналами и трактами на физическом уровне для повышения производительности и качества передачи потоков данных в сети *SDN*.

Список используемых источников

1. Гольдштейн А. Б. Модели и методы эксплуатационного управления инфокоммуникационными сетями: дис. ... докт. техн. наук 05.12.13 / Гольдштейн Александр Борисович. Санкт-Петербург, 2019. 231с.

2. Программно-конфигурируемые сети SDN. Протокол OpenFlow [Текст]: учебное пособие / Б. С. Гольдштейн, В. С. Елагин, А. А. Зарубин, А. Е. Селиванов; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2018. 47 с.

3. Ху, Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Пер. с англ. П. Л. Бузыцкого [и др.]; под редакцией А. А. Фридмана. М.; Мир, 1974. 519с

4. Потоки в сетях / Л. Р. Форд, Д. Р. Фалкерсон /Пер. с англ. И. А. Вайнштейна. М.; Мир, 1966. 276 с.

PROGRAMMABLY CONFIGURABLE NETWORKS BASED ON INVARIANT STRUCTURES

Lyubimov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper proposes an approach to automating the management of transport networks for various purposes, including wide-area computer networks, within the paradigm of promising software-defined networking technology. The concept of an invariant structure at the physical data transmission layer is introduced. It is shown that a transport communication network with integer line throughput values can be associated with a finite set of invariant structures. It is proposed to supplement software-defined networking technology in the plane of flow switching control on network devices with channel switching at the physical network level based on invariant structures.

Key words: software-defined networks, flow and channel switching control, invariant physical network structures

УДК 519.67 +573.6
ГРНТИ 28.17.33

БАЙТСТРИМЕРНЫЙ НЕЙРОННЫЙ ПРОЦЕССОР

Л. М. Макаров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Представлена компьютерная имитационная модель нейронного процессора, способного постоянно воспроизводить и поддерживать большие массивы данных, что в реальности соответствует наличию операций воспроизведения памяти, необходимой при осуществлении творческой деятельности человека. Предложен алгоритм воспроизведения динамической компьютерной памяти, воспроизводимый по аналогии с естественными нейронными процессами в задачах искусственного интеллекта.

искусственный интеллект, компьютерное моделирование

Введение

Творческий процесс, воспроизводимый высокоразвитыми живыми организмами, реализуется нейронной сетью. Моделирование восприятия внешних факторов, с учетом реального функционального состояния организма, можно рассматривать в терминах и понятиях теории перколяции. Математический базис теории перколяции хорошо интерпретируется в терминах различных физических и биофизических задач. Относительно простой уровень описания различных процессов формируется на представлении прохождения потоков жидкости сквозь пористый объем некоторого тела. В задачах электротехники такая модель позволяет убедительно воспроизвести серию оценок проводимости, а применительно к задачам искусственного интеллекта (ИИ) сформировать группу оценок для семантически связанных понятий, рождающихся в структуре головного мозга человека.

Теоретические основы

Структура головного мозга (СГМ) человека представлена несколькими функционально связанными отделами, в определенной степени поддерживающими коммуникационные акты живого организма посредством сенсорной системы. Информационные потоки, зарождающиеся в разных отделах сенсорной системы, формируют нейронные паттерны – образы событий, речевые словоформы, акустические, тактильные или осязательные образы.

Естественная асинхронность информационных потоков объясняется как различиями в скорости формирования нейронных паттернов, так и сложностью внутренней интерпретации образов событий. Наличие высокого уровня вариабельности элементов информационных потоков в сенсорной системе человека вызывает трудности объяснения феномена памяти. Несмотря на различие принципов детектирования сигнальных пакетов сенсорами организма в нейронной сети со всей очевидностью обнаруживается факт выделения семантической доминанты и сохранения паттерна в СГМ в формате внутренней памяти.

Феномен памяти, по мнению Р. Пенроуза реализуется на семействе микротрубочек, образующих структуру нейронов [1]. Здесь постоянная циркуляция псевдослучайных химических частиц – нейромедиаторов формирует специфический паттерн, характерный для восприятия одной или несколькими областями головного мозга человека [2]. В теоретической биофизике паттерн, обладает физическими показателями такими как амплитуда и частота сигнала, но в структуре нейронной сети характеризуется набором химически разных нейромедиаторов, возникающим в контактном слое нейронов (рис. 1).

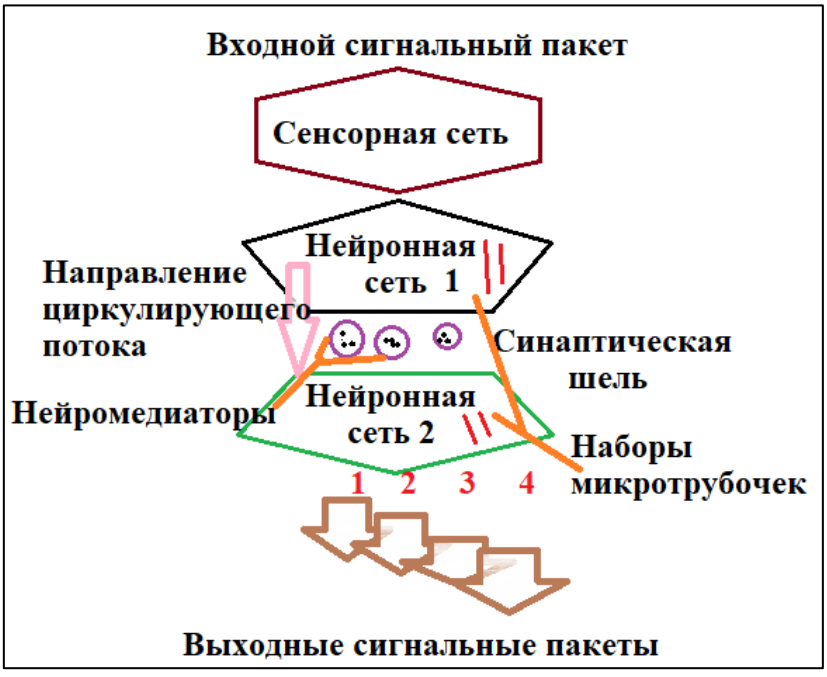


Рис. 1. Схема формирования сигнальных пакетов

Следуя этим представлениям в работах по мягкой логике вычислений, применительно к формированию паттернов в СГМ, рассматривается математическая модель формирования массива данных, обладающая свойством вариабельности элементов в заданных пределах [3].

Эта идея обладает высоким уровнем тождественности с моделированием на компьютере битового потока данных (Bitstream). Когда битовый поток захватывается и сохраняется на носителе информации, то создается компьютерный файл. Такая процедура подобна рабочим процессам сенсорной и нейронной сети.

Вначале на первом нейроне инициализируется набор медиаторов, затем пройдя сквозь «контакт – синаптическую щель» нейромедиаторы активизирует вторую нейронную сеть (рис. 1). Эта серия из активаторов (нейромедиаторов) может циклически повторяться. Для математической модели важно найти формализованную процедуру, способную продемонстрировать возможность осуществления этого процесса.

Примем в качестве начального условия возможность существования циклически повторяющихся процессов, которые обнаруживаются в живой материи. Данное свойство характерно для диссипативных систем [4], способных преобразовывать хаос входных информационных и ресурсных потоков в сбалансированный потенциал. Такой потенциал проявляется в формате нейронного образа как в процессах воссоздания новых клеточных популяций, так и в воспроизводстве элементов памяти. Следует признать, что современные представления о механизмах образования памяти в живых организмах воспроизводятся не только в терминах генетики, но и посредством моделирования байтстримерных нейронных процессов на глубину до четырех уровней.

Постановка проблемы

Термин байтстримерный процессор происходит от английского глагола to stream, что означает «течь», «течение». В обычном понимании русского языка слово «стриминг» можно интерпретировать как «прямая трансляция». конфигурируемых логических блоков, подобных переключателям с множеством входов и одним выходом (логические вентили). В цифровых схемах такие переключатели реализуют базовые двоичные операции AND, NAND, OR, NOR и XOR, на основе языка HDL – hardware description language. Это специализированный компьютерный язык, используемый для описания структуры и поведения электронных функциональных модулей. С этой точки зрения байтсримерный процессор, получивший большое распространения в современной вычислительной технике, обеспечивает одновременной воспроизведение нескольких форматов входных потоковых пакетов [4, 5]. Обычно на практике рассматриваются аудио и видео файлы. В этом отношении битстримерный процессор можно рассматривать как

прототип естественного альянса группы нейронов, способных одновременно воспринимать информационные пакеты и длительное время сохранять в памяти запечатленные образы.

В настоящее время идея о возможности существования нейронной памяти, на элементах – микротрубочках, широко обсуждается в научной литературе [1]. Декларируется, что существование нейронной памяти можно обнаружить только средствами математики – математической модели. И это справедливо, поскольку реальные аппаратные исследования СГМ, неправленые на решение этой проблемы – инвазивны.

Математическая модель нейронной памяти

Следуя этим представлениям, полагаем наличие сенсорной сети и матричной структуры нейронной сети – 10 x10 элементов, где воспроизводится образ паттерна по выражению (1):

$$a_i = m_j * n_{1-8} \tag{1}$$

Сенсорная сеть заполняет элементами ($n_{1\text{-}8}$) нейронную сеть, которые случайным образом распределены на интервале 1-8 (рис. 2). Положим m_j = 121 массовый коэффициент, идентифицирующий аминокислоту в геноме.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	605	847	968	847	847	242	847	726	968	484
2	484	484	726	121	605	363	605	605	968	363
3	242	363	484	968	847	968	605	847	121	242
4	363	726	121	242	726	242	484	968	847	605
5	847	121	484	726	121	726	363	363	726	363
6	242	484	726	242	726	363	605	847	847	847
7	605	363	484	968	121	484	605	121	484	605
8	726	968	968	726	726	484	363	847	363	726
9	847	242	605	968	121	605	847	121	484	968
10	847	847	605	121	968	242	726	605	121	726

Рис. 2. Табличный формат образа

Применим правило из теории мягкой логики [3].

$$\begin{gathered} \text{ЕСЛИ} \quad n_i > n_{i+1} \\ \text{то} = n_i \\ \text{иначе} = n_{i+1} \end{gathered} \tag{2}$$

Повторим процедуру 4 раза. Построим серию матриц – массивов. Рассмотрим последний – итоговый массив (рис. 3), в котором оценим сумму элементов по диагонали матрицы. Процедуру исполним по выражению (3).

$$\text{Правая диагональ матрицы } \Sigma_{\text{пр.}} n_j = 42 \quad (3)$$
$$\text{Левая диагональ матрицы } \Sigma_{\text{лев.}} n_j = 40$$

Установим правило – если сумма элементов (G) по любой диагонали матрицы образует целочисленное значение и кратна массовому показателю аминокислоты (m_j), то декларируем наличие памяти в нейронной сети именно на установленное химическое соединение. В данном случае констатируем наличие показателей: 42 и 40.

	1	2	3	4	5	6
1	726	242	726	242	968	726
2	726	726	968	726	968	726
3	847	847	968	726	968	726
4	847	847	968	726	968	726
5	847	847	968	726	968	726
6	847	847	968	968	968	726

Рис. 3. Табличный формат итогового 4 образа

Тогда констатируем, что при условии известного показателя массы химического соединения (m_j), активно участвующего в образовании модельного массива данных, обнаружение именно целочисленного показателя G свидетельствует о наличии циклического процесса, а следовательно, о эффекте постоянно обновляемой памяти.

Полученный результат свидетельствует о возможности формального извлечения знаний о наборе нейромедиаторов в синаптической щели. Это позволяет исключительно аппаратными вычислительными средствами создать модель идентификации разных определений, понятий и знания на элементах нейронной сети.

Заключение

Рассматривая актуальную проблему обнаружения «принципов формирования памяти на нейронной сети элементов», следует признать, что только математические методы анализа исходных биофизических представлений о информационных потоках создают условия синтеза формального правила. Действительно, задавая в математической модели наличие возможности инициализировать случайный поток событий, причем в широком диапазоне значений, собственно, как и происходит в действительности на биологической структуре, сложно обнаружить формализм идентификации химического соединения.

В общедоступном понимании проблемы идентификации химического соединения находится тезис, что химическая композиция биологических веществ воспроизводит определенное функциональное состояние организма, в том числе и сложные процессы «памяти паттернов». Это свойство следует соотносить с наличием нейронного байтсримерного процессора. Большое количество нейронных ансамблей, распределенных по разным отделам головного мозга способны формировать паттерны событий о внешних событиях, синтезируемых на информационном потоке сенсорной системы.

Развивая эти представления, можно констатировать, что память, как функциональная способность организма, реализуется на нейронной сети головного мозга посредством инжекции большого набора ингредиентов – биохимически активных элементов. Изменение основного набора химических ингредиентов может привести к нарушению памяти либо к усилению возможностей создавать творческие паттерны действительности, что представляет значительный интерес в области создания технических систем с ИИ.

Список используемых источников

1. Пенроуз Р. Тени разума: в поисках науки о сознании. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 688 с.

2. Макаров Л. М. Поздняков А. В. Квантовая суперпозиция элементов нейронной структуры Международный журнал гуманитарных и естественных наук // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2025. vol. 3-1 (102). DOI:10.24412/2500-1000-2025-3-1-214-220.

3. Зак Ю. А Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии. Издательство:Ленанд. 2022. 352 с.

4. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: URSS, 2022. 320 с.

5. Нейман Дж. Ф. Вычислительная машина и мозг. М.: Аст. 2022. 192 с.

BYTSTREAM NEURAL PROCESSOR

Makarov L.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

A computer simulation model of a neural processor capable of constantly reproducing and maintaining large arrays of data is presented, which in reality corresponds to the presence of memory reproduction operations necessary for human creative activity. An algorithm for reproducing dynamic computer memory is proposed, which is based on natural neural processes in artificial intelligence tasks.

Key words: artificial intelligence, computer modeling

УДК 621.396
ГРНТИ 05.27.14

АДАПТИВНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ ДЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

А. А. Мохова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследуется эффективность метода максимизации отношения сигнал–помеха–шум (МОСШ) в радионавигационных системах для прямолинейно движущихся объектов. Рассматривается линейная антенная решетка, принимающая несколько полезных сигналов, помеху и шум. Моделирование учитывает изменения углов прихода, мощность помехи и доплеровский сдвиг, возникающий при движении, и анализирует их влияние на работу адаптивного фильтра и форму диаграммы направленности.

адаптивные антенные решетки, локальная навигация, прямолинейное движение, обработка сигналов, МОСШ, подавление помех, оптимальные весовые коэффициенты, диаграмма направленности

В последние годы задачи адаптивной пространственно-временной обработки сигналов приобретают особую актуальность в связи с развитием беспилотных летательных аппаратов и подвижных радиолокационных платформ. Движение носителя антенной решетки приводит к изменению углов прихода сигналов и возникновению доплеровских сдвигов, что существенно усложняет процесс пространственной фильтрации.

В данной работе рассматривается применение метода максимального отношения сигнал–шум (МОСШ) для адаптивной антенной решетки, установленной на прямолинейно движущемся объекте. Антенна принимает несколько полезных сигналов, одну направленную помеху и аддитивный белый гауссовский шум.

Целью работы является исследование работы метода МОСШ на подвижной антенной решетке с учетом влияния направления движения, уровней сигналов и помех и доплеровских эффектов.

Рассматривается равномерная линейная антенная решетка, состоящая из N=4 элементов с межэлементным расстоянием, равным половине длины волны. Направляющий вектор решетки имеет вид:

$$a(\theta) = e^{-j\pi n sin\theta}, \qquad n = 0, 1, 2, 3.$$

На вход антенной решетки поступают три полезных сигнала с временно изменяющимися углами прихода $\theta_i(t) = \theta_0 + \omega_\theta \cdot t$ (где ω_θ – угловая ско-

рость сигналов), одна направленная помеха и аддитивный белый гауссовский шум. Вектор входных сигналов описывается [1]:

$$x(i) = \sum_{i=0}^{3} a(\theta_i(t))s_i(t) + +a(\theta_p(t))s_p(t) + n(t),$$

где $a(\theta_i(t))$ – направляющий вектор антенной решетки, соответствующий мгновенному углу прихода i-го полезного сигнала $\theta_i(t)$, $s_i(t)$ – временная реализация i-го полезного сигнала с учетом фазовых и доплеровских искажений, $a(\theta_p(t))$ – направляющий вектор помехи, соответствующий мгновенному углу прихода помехового сигнала $\theta_p(t)$, $s_p(t)$ – помеховый сигнал, $n(t)$ – вектор аддитивного белого гауссовского шума.

В связи с движением носителя антенной решетки каждый принимаемый сигнал испытывает доплеровский сдвиг частоты, определяемый выражением:

$$f_D(t) = f_0 \frac{c}{c - v \cdot \cos\left(\theta(t) - \theta_{дв}\right)} - 1,$$

где θ(t) – мгновенный угол прихода сигнала к антенне в момент времени t, $\theta_{дв}$ – направление движения объекта.

Ковариационная матрица входных сигналов оценивается по конечному временному окну на основе дискретных отсчетов сигналов, принимаемых элементами антенной решетки. Оценка ковариационной матрицы имеет вид [2]:

$$R = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} x(i)x^H(i).$$

Оптимальный весовой вектор МОСШ вычисляется как [3]

$$w_{opt} = R^{-1}A(A^H R^{-1} A)^{-1} g,$$

где $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), a(\theta_3), a(\theta_4)]$, а вектор отклика $g = [1,1,1,0]^T$ задает прием трех полезных сигналов с одновременным подавлением помехи.

Выходные мощности сигналов, помехи и шума рассчитываются как

$$P_{sig} = w^H R_{sig} w,$$
$$P_p = w^H R_p w,$$
$$P_n = w^H R_n w,$$

а отношение сигнал/помеха+шум ОСПШ $= \frac{P_{sig}}{P_p + P_n}$.

Рассматривался сценарий, когда амплитуда полезного сигнала была выше мощности помехи, при этом источники располагались под углами $\theta_0 = [0°, -20°, 30°]$, а помеха – под углом $\theta_p = 60°$ (Рис. 1). Объект двигался с направлением $\theta_{дв} = 10°$, создавая доплеровский сдвиг. Моделирование по-

казало, что адаптивный фильтр эффективно подавляет помеху, обеспечивая высокий SIR и стабильный SINR.

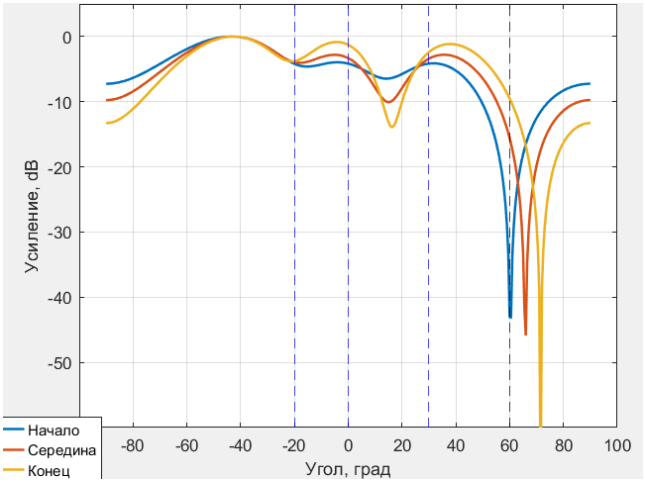


Рис. 1. Диаграмма направленности для сигналов и объекта, движущихся в разных направлениях (сигнал выше помехи)

```
Выходные мощности и ОСПШ на выбранных моментах времени:
Время 0.033 с: P_sig = 27.654, P_intf = 0.000066, P_noise = 0.099, SIR = 56.20 dB, SINR = 24.45 dB
Время 0.758 с: P_sig = 27.672, P_intf = 0.000043, P_noise = 0.077, SIR = 58.05 dB, SINR = 25.55 dB
Время 1.500 с: P_sig = 27.765, P_intf = 0.000025, P_noise = 0.070, SIR = 60.37 dB, SINR = 25.99 dB
```

При увеличении мощности помехи эффективность адаптивного фильтра снижается. Тем не менее, система сохраняет способность выделять полезные источники, однако значения SIR и SINR снижаются, а диаграмма направленности демонстрирует повышенную чувствительность к изменению углов прихода сигналов. Результаты указывают на наличие ограничений адаптивного фильтра в условиях доминирующей помехи и на определяющую роль относительного соотношения мощностей сигнала и помехи.

```
Выходные мощности и ОСПШ на выбранных моментах времени:
Время 0.033 с: P_sig = 3.023, P_intf = 0.000513, P_noise = 0.105, SIR = 37.71 dB, SINR = 14.56 dB
Время 0.758 с: P_sig = 3.025, P_intf = 0.000335, P_noise = 0.069, SIR = 39.55 dB, SINR = 16.38 dB
Время 1.500 с: P_sig = 3.035, P_intf = 0.000197, P_noise = 0.078, SIR = 41.87 dB, SINR = 15.91 dB
```

При движении объекта в направлении одного из полезных сигналов ($\theta_{дв} = \theta_0(3)$) доплеровский сдвиг для этого сигнала значительный, что позволяет адаптивной антенной решетке формировать устойчивый главный лепесток диаграммы направленности и поддерживать высокий уровень SINR для данного сигнала (Рис. 2). Остальные полезные сигналы и помехи при этом испытывают более заметные изменения углов прихода, что может приводить к перестройке боковых лепестков и уменьшению глубины нулей. Моделирование показало, что адаптивный фильтр эффективно выделяет «совпадающий» сигнал, а значения SIR и SINR для остальных источников остаются удовлетворительными.

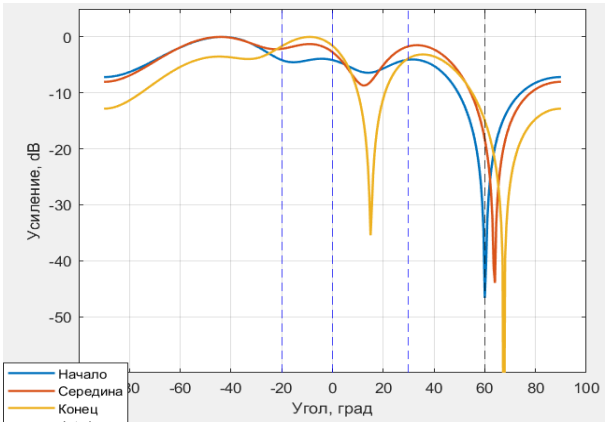


Рис. 2. Диаграмма направленности для сигналов, когда объект движется в сторону одного из сигналов (сигнал выше помехи)

```
Выходные мощности и ОСПШ на выбранных моментах времени:
Время 0.033 с: P_sig = 26.831, P_intf = 0.000030, P_noise = 0.113, SIR = 59.55 dB, SINR = 23.74 dB
Время 0.758 с: P_sig = 27.088, P_intf = 0.000020, P_noise = 0.093, SIR = 61.35 dB, SINR = 24.63 dB
Время 1.500 с: P_sig = 27.131, P_intf = 0.000015, P_noise = 0.071, SIR = 62.52 dB, SINR = 25.80 dB
```

При движении объекта под углом, близким к 90° относительно одного из полезных сигналов ($\theta_{дв} = \theta_0(1) + 90^\circ$) доплеровский сдвиг для этого сигнала относительно небольшой. Небольшие изменения углов прихода быстро влияют на величину сдвига, что приводит к временному смещению главного лепестка диаграммы направленности и снижению уровней SIR и SINR для данного сигнала (рис. 3). Остальные полезные сигналы и помехи, угловое положение которых относительно направления движения менее критично, продолжают эффективно выделяться адаптивным фильтром. Этот сценарий демонстрирует ограничения метода МОСШ при высокой динамике углов прихода: эффективность пространственного фильтрования временно уменьшается при значительных изменениях углов и частоты сигнала.

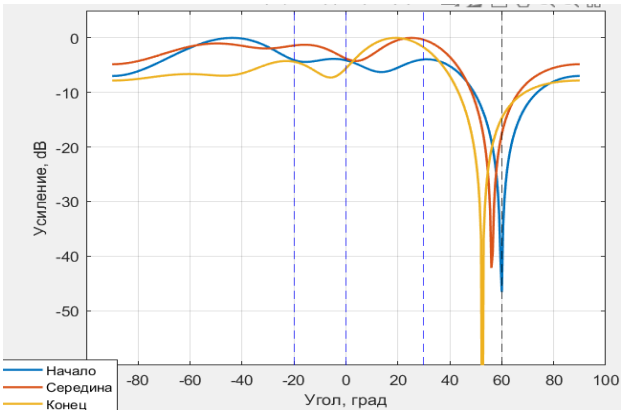


Рис. 3. Диаграмма направленности для сигналов, когда объект движется перпендикулярно одному из сигналов (сигнал выше помехи)

```
Выходные мощности и ОСПШ на выбранных моментах времени:
Время 0.033 с: P_sig = 20.626, P_intf = 0.000029, P_noise = 0.115, SIR = 58.52 dB, SINR = 22.54 dB
Время 0.758 с: P_sig = 20.885, P_intf = 0.000030, P_noise = 0.103, SIR = 58.38 dB, SINR = 23.06 dB
Время 1.500 с: P_sig = 20.896, P_intf = 0.000056, P_noise = 0.175, SIR = 55.71 dB, SINR = 20.76 dB
```

Адаптивный пространственный фильтр демонстрирует высокую эффективность при выделении полезных сигналов и подавлении помехи, обеспечивая устойчивые значения SIR и SINR в условиях умеренной мощности помехи и относительно медленной динамики углов прихода. Эффективность фильтра снижается при доминирующей помехе, близком угловом расположении сигналов и помехи или при значительных изменениях углов прихода и связанных с ними доплеровских сдвигах, возникающих при движении носителя почти перпендикулярно источнику. В этих условиях наблюдаются временные смещения главных лепестков диаграммы направленности, уменьшение глубины нулей и снижение стабильности SIR и SINR. Полученные результаты показывают, что применение метода ограничено ситуациями с высокой динамикой углов прихода или неблагоприятным соотношением мощностей сигнала и помехи, что следует учитывать при проектировании систем адаптивного пространственного фильтрования.

Список используемых источников

1. Григорьев В. А., Щесняк С. С., Гулюшин В. Л., Распаев Ю. А., Лагутенко О. И., Щесняк А. С. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие. Часть 1 / под общ. ред. В. А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 179 с.

2. Лукьянчиков А. И., Гарманов С. С., Моисеев А. П. Обзор методов пространственной фильтрации при помощи адаптивной антенной решетки в системах спутникового позиционирования // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 12. URL = http://web.snauka.ru/issues/2016/12/74815 (дата обращения: 31.01.2026).

3. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с., ил.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры РТ СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Е. И. Глушанковым.

ADAPTIVE LOCAL NAVIGATION FOR A LINEARLY MOVING OBJECT

Mokhova A. A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper investigates the efficiency of the signal-to-interference-and-noise ratio (MVDR) in radiolocation systems for linearly moving objects. A linear antenna array receiving several useful signals, interference, and noise is considered. The modeling takes into account variations in arrival angles, interference power, and Doppler shift caused by motion, and analyzes their impact on the performance of the adaptive filter and the shape of the radiation pattern.

Key words: adaptive antenna arrays, local navigation, linear motion, signal processing, MVDR, interference suppression, optimal weight coefficients, radiation pattern

УДК.621.396.6
ГРНТИ 47.47

СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Ю. А. Никитин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрены различные варианты построения усилительных каскадов: каскодная схем общий коллектор-общая база, схема с общим эмиттером и схема, объединяющая два каскада; общий коллектор плюс общий эмиттер, проведен их сравнительный анализ и моделирование в программе Microcap12 с точки зрения повышения линейности усиления и увеличения площади усиления.

усилитель, схема с общим эмиттером, каскодная схема общий коллектор-общая база, полоса усиливаемых частот, уровень дискретных спектральных составляющих

В [1] приведена схема усилительного каскада ОК+ОЭ в качестве предоконечного каскада усилительного тракта фотоприемного устройства. Представляет интерес сравнение основных характеристик указанного каскада с каскадами аналогичного назначения, выполненными по схеме ОЭ и по каскодной схеме ОК-ОБ.

На рис. 1 приведены схемотехнические модели указанных каскадов, выполненные в программе Microcap12 [2].

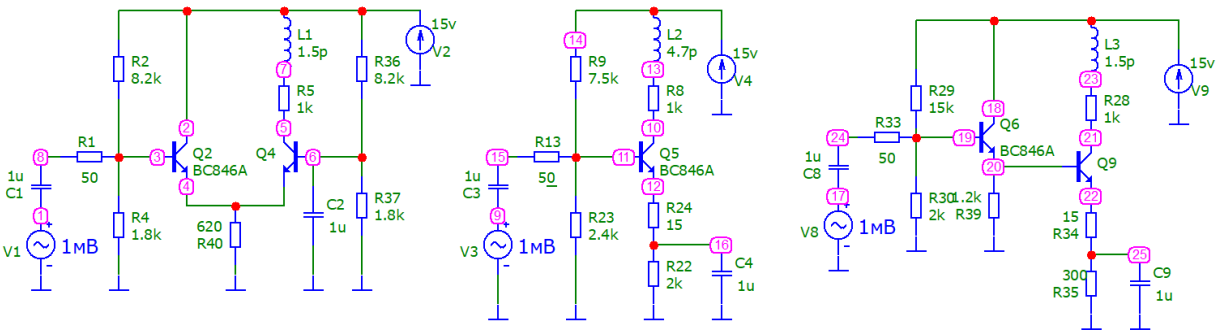


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы моделей каскадов с индуктивной высокочастотной коррекцией: ОК-ОБ (синяя линия), ОЭ (красная линия), ОК+ОЭ (зеленая линия)

На рис. 2 приведены временны́е диаграммы выходного сигнала при условии подачи на вход каскадов одинакового напряжения 1 мВ.

Информативным параметром контроля качества выходного колебания может служить его спектральный состав [3].

Также важным параметром является полоса усиливаемых частот [4]. Для увеличения площади усиления удобно применять высокочастотную индуктивную коррекцию [1], с помощью которой можно существенно расширить полосу пропускания каскада без потери усиления.

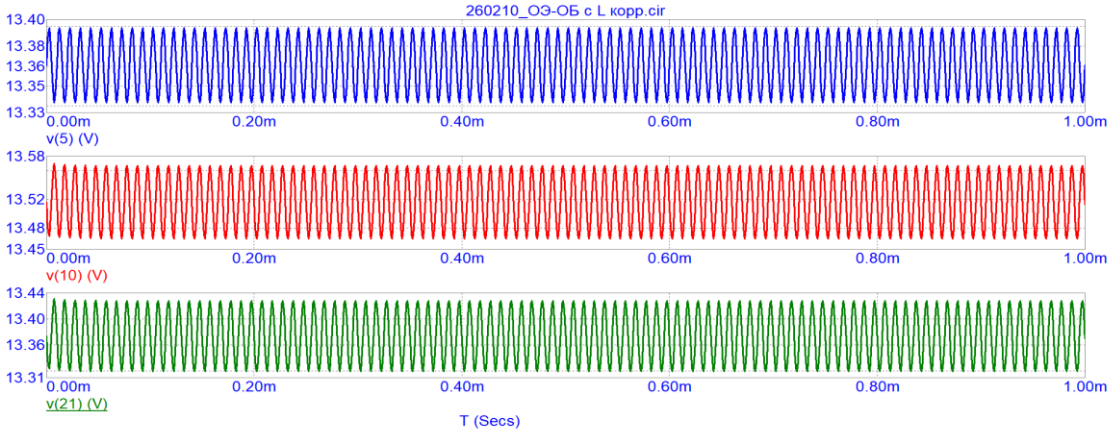


Рис. 2. Временны́е диаграммы выходных колебаний каскадов с индуктивной высокочастотной коррекцией: ОК-ОБ (синяя линия), ОЭ (красная линия), ОК+ОЭ (зеленая линия)

Моделирования каскадов (рис. 3 и рис. 4) показывает, что введение индуктивной высокочастотной коррекции наиболее эффективно в каскодной схеме ОК-ОБ и позволяет получить почти двухкратный выигрыш.

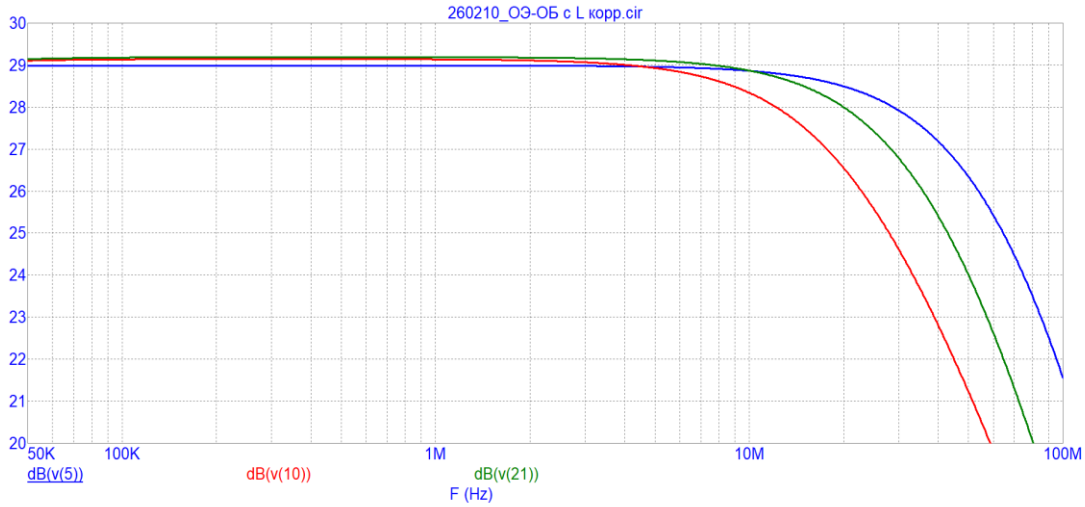


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики каскадов без индуктивной высокочастотной коррекцией: ОК-ОБ (синяя линия), ОЭ (красная линия), ОК+ОЭ (зеленая линия)

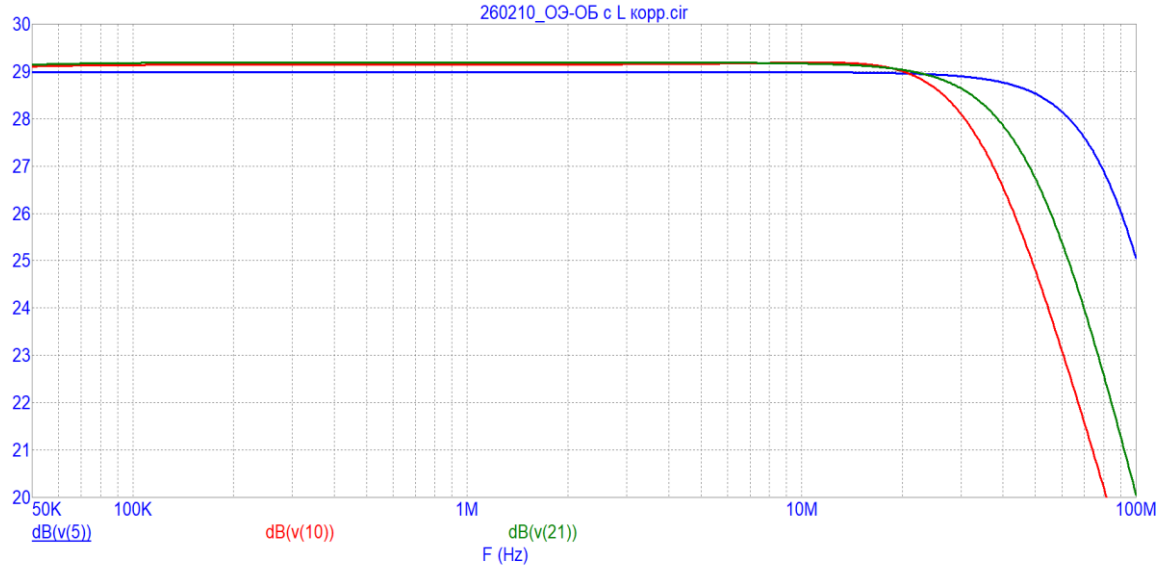
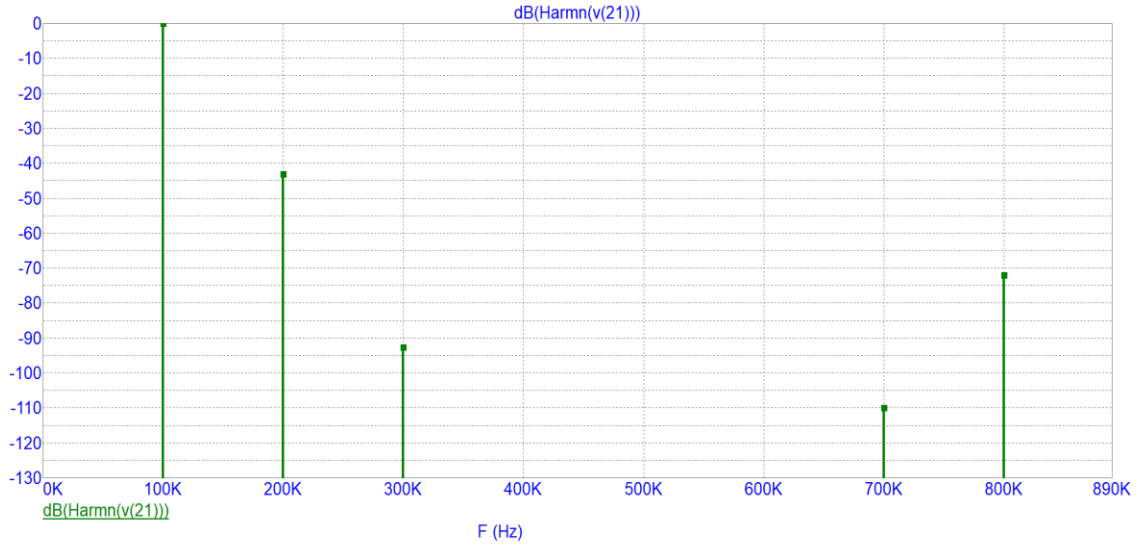
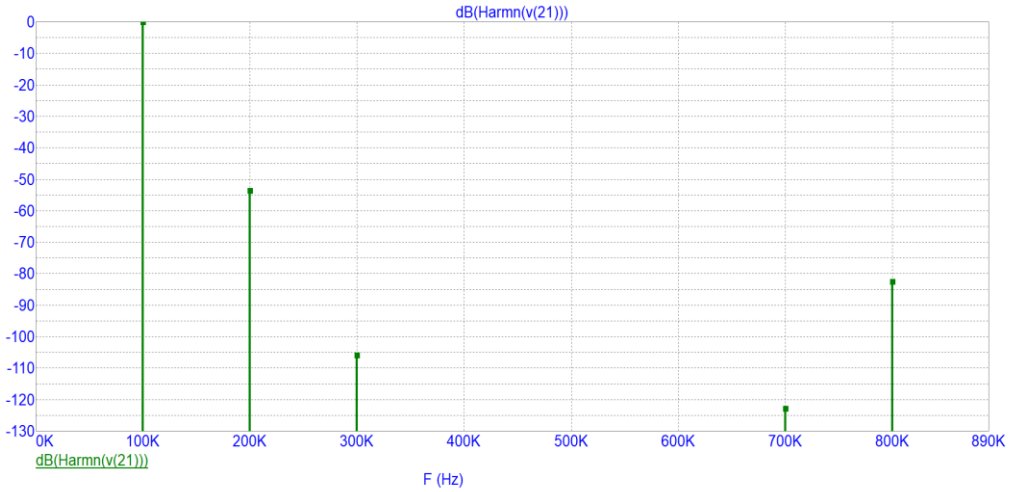


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики каскадов с индуктивной высокочастотной коррекцией: ОК-ОБ (синяя линия), ОЭ (красная линия), ОК+ОЭ (зеленая линия)

Спектральный состав выходного колебания позволяет оценить линейность усиления и является критически важной характеристикой в прецизионных системах формирования и передачи информации [3]. На Рис. 5-7 приведены спектры колебаний на выходе рассматриваемых каскадов.

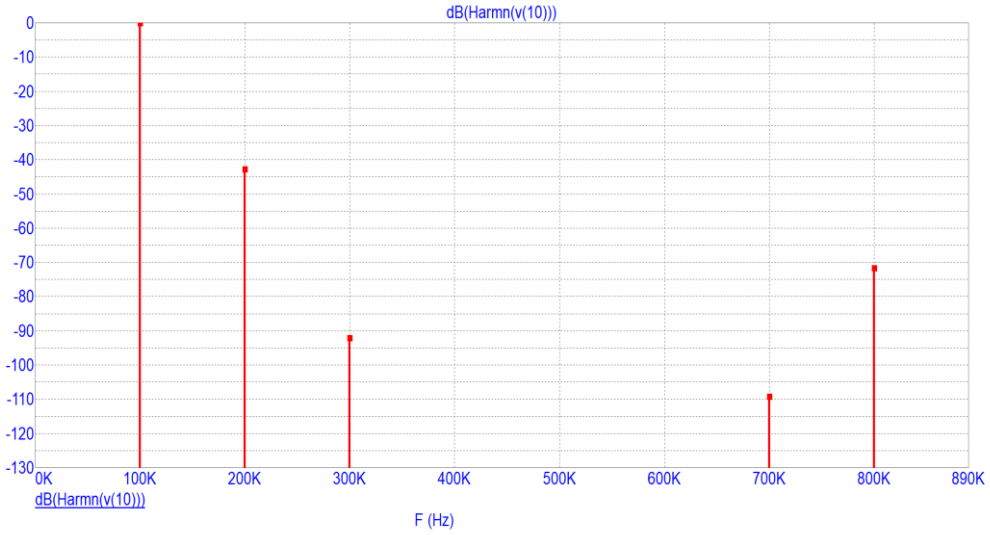


Относительные уровни гармоник: 2-я: -54дБн, 3-я: -106дБн ($R34 = 0$)

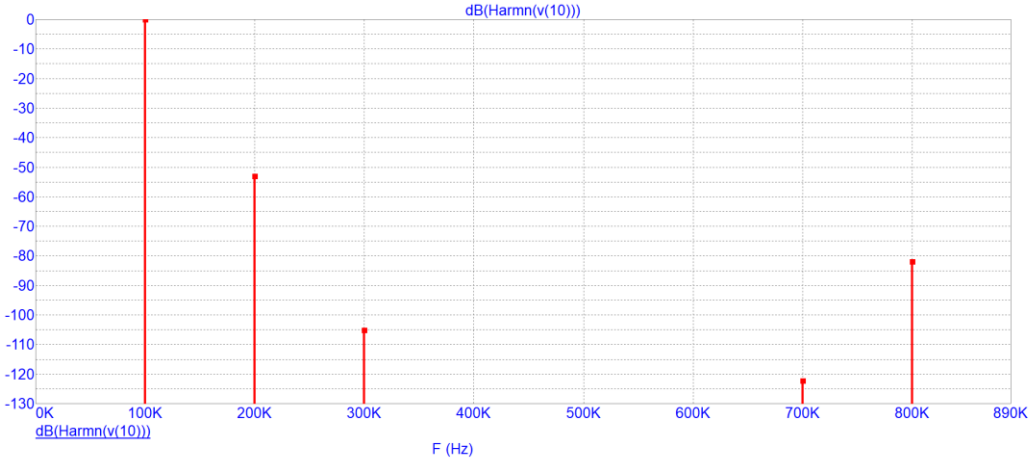


Относительные уровни гармоник: 2-я: -54дБн, 3-я: -106дБн ($R34$ = 15 Ом)

Рис. 5. Спектр выходного колебания каскада ОК+ОЭ

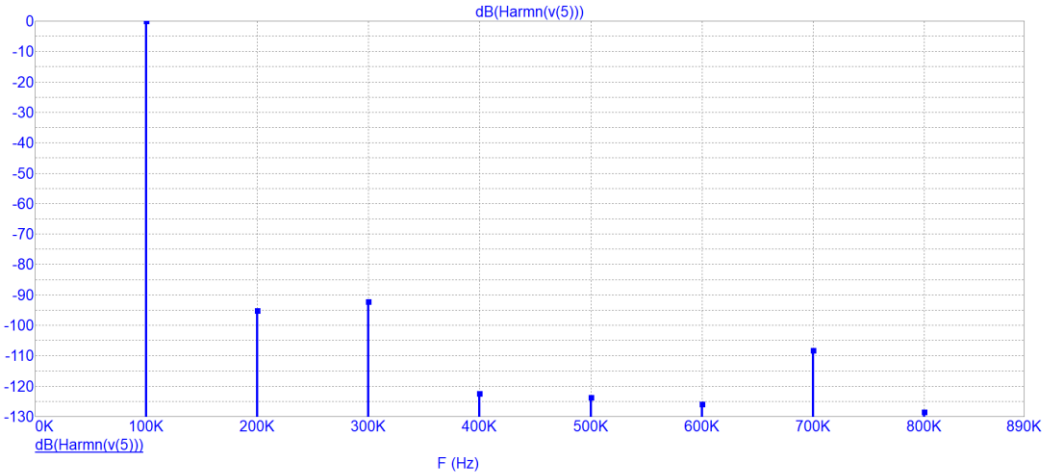


Относительные уровни гармоник: 2-я: -43дБн, 3-я: -92дБн ($R24$ = 0)



Относительные уровни гармоник: 2-я: -53дБн, 3-я: -105дБн ($R24$ = 15 Ом)

Рис. 6. Спектр выходного колебания каскада ОЭ



Относительные уровни гармоник: 2-я: -95дБн, 3-я: -92дБн
Рис. 7. Спектр выходного колебания каскада ОК-ОБ

Анализ приведенных данных позволяет сделать 2 вывода. Первый вывод (ожидаемый) – введение последовательной отрицательной обратной связи (резистор в цепи эмиттера) повышает линейность усиления. Второй вывод – каскодная схема является предпочтительной при построении усилительных каскадов как с точки зрения линейности, так и с точки зрения минимизации обратного прохождения сигнала, поскольку емкость обратной связи $C_{кб}$ в каскодной схеме ОК-ОБ у обоих транзисторов замкнута на землю.

Список используемых источников

1. Схемотехника. Проектирование усилителя-фотоприемника волоконно-оптической системы передачи информации: учебно-методическое пособие по выполнению курсового проектирования / Ю. А. Никитин, В. А. Филин, В. А. Юрова; СПбГУТ. Санкт-Петербург, 2021. 46 с.

2. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. 618 с., илл.

3. Электроника и схемотехника. Часть 1: учебное пособие / Ю. А. Никитин, В. А. Юрова; СПбГУТ. СПб., 2020. 64 с.

4. Павлов В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. Н. Павлов. Москва: Издательский центр «Академия», 2008.

COMPARATIVE MODELING OF AMPLIFIER CASCADES

Yu. A. Nikitin
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Various amplifier stage design options are considered, compared, and modeled in Microcap12 for improving gain linearity and increasing gain area.

Key words: amplifier, open-ended emitter circuit, open-ended cascode circuit, amplified frequency band, discrete spectral component level

УДК 621.391.8
ГРНТИ 49.33.29

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G В ТУРКМЕНИСТАНЕ

А. М. Ниязгулыева, Ч. Сейитнепесов

Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана

Технологические инновации, привнесенные в телекоммуникационный сектор с внедрением технологий мобильной связи 5G, позволят увеличить пропускную способность сотовой сети, существенно увеличить скорость передачи данных и создать возможности для предложения новых видов услуг. В данной научной статье анализируются технические решения, связанные с внедрением технологии сотовой связи 5G в сфере связи Туркменистана.

5G, Туркменистан, телекоммуникации, город Аркадаг, скорость передачи данных, модель Уолфиша-Икегамы, умный город, цифровизация, Huawei, Nokia, MIMO, Интернет вещей

В Туркменистане, как и во всем мире, телекоммуникационный сектор находится на пороге внедрения нового, пятого поколения мобильной связи. Внедрение каждого поколения мобильной связи стимулирует развитие не только телекоммуникационного сектора, но и экономики всей страны.

Внедрение технологий мобильной связи 5G в телекоммуникационный сектор приведет к увеличению пропускной способности сотовой сети, значительному росту скорости передачи данных и созданию возможностей для предоставления новых видов услуг.

В свою очередь, это приведет к созданию инноваций в использовании мобильных телефонов. Развитие коммуникаций и инновационных цифровых услуг будет способствовать экономическому росту за счет повышения производительности труда, автоматизации предприятий и внедрения новых технологий в различные сектора экономики и человеческой деятельности [1].

В городе Аркадаг запущена технология мобильной связи 5G. Работы по установке системы проводились совместно с компанией Huawei из Китайской Народной Республики. Технология 5G обладает высокой пропускной способностью данных, обеспечивая надежное и стабильное соединение. Эта

инновационная технология способна подключать и обеспечивать работу сотен тысяч устройств на территории площадью 1 квадратный километр.

В рамках инфраструктуры технологии 5G также будут использоваться новые решения:

– передвижные базовые станции (передвижной узел 5G);
– передвижные сети передачи данных (передвижная магистральная сеть 5G).

Внедрение технологии 5G позволит создавать интеллектуальные транспортные сети (дополнительные возможности для повышения безопасности дорожного движения за счет установки 5G-модемов в транспортные средства на автомагистралях).

Основные технические требования к технологии мобильной связи 5G:

– скорость передачи данных до 10 Гбит/с на абонента в прямом канале, до 5 Гбит/с в обратном канале;
– объем трафика, потребляемого мобильным абонентом в месяц, составляет до 500 ГБ;
– максимальное количество абонентских устройств, подключенных к радиосетям 5G в одной ячейке сети, составляет до 300 000.

Основные услуги мобильной связи 5G:

– мультимедийные услуги (видео Ultra HD, 3D-видео, онлайн-игры);
– облачные услуги (государственные услуги, бизнес-приложения и т.д.);
– виртуальные услуги (образование, развлечения);
– дополнительные услуги (здравоохранение, военная промышленность, образование, развлечения);
– социальные сети (развлечения, покупки);
– взаимодействие между машинами – услуги M2M (энергетика, транспорт, здравоохранение, торговля, общественная безопасность, промышленность, умный дом и жилье – государственные услуги);
– персональные услуги (транспорт, здравоохранение, бытовая техника и развлечения) [2, 3].

Технология мобильной связи 5G является неотъемлемой частью «умного» города и его важной составляющей. Технология 5G позволяет городу Аркадаг осуществлять цифровое управление деятельностью своего «умного» города и «умных» экосистем, промышленных комплексов, здравоохранения, образования, промышленности и сельского хозяйства.

С внедрением высокоскоростной интернет-сети в городе Аркадаг возможности технологии 5G охватят каждый уголок города.

При организации сетей сотовой связи 5G в крупных городах необходимо учитывать, прежде всего, архитектурные и географические особенности города. Изучение влияния радиопомех на затухание сигналов в радиоканалах сетей сотовой связи 5G в густонаселенных районах города имеет большое значение для оптимизации технико-экономической эффективности зон обслуживания базовых станций таких сетей. Задача состоит в проведении модельных расчетов на основе модели Уолфиша-Икегамы для определения характеристик распространения радиосигналов от базовых станций сотовых сетей 5G в условиях города Ашхабада.

В настоящее время во всем мире наблюдается большой интерес к системе 5G, и она широко используется. В Туркменистане ведется ряд работ по повышению технико-экономической эффективности системы сотовой связи. Рабочие характеристики сотовых сетей 5G позволяют, в частности, достигать скорости передачи данных до 10 Гбит/с на абонента в прямом канале и до 5 Гбит/с в обратном канале, а также объема трафика, потребляемого мобильным абонентом в месяц, до 500 ГБ. Кроме того, в качестве основных услуг сетей 5G предлагаются мультимедийные, облачные, виртуальные и дополнительные услуги, социальные сети, а также частные услуги (энергетика, транспорт, здравоохранение, торговля, общественная безопасность, промышленность, умный дом, жилищно-коммунальные услуги). В целях выполнения поручения президента Туркменистана о широком внедрении и развитии цифровой сети в стране, в Институте телекоммуникаций и информатики Туркменистана была установлена современная коммуникационная «ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ СИСТЕМА 5G» компании Nokia. Система демонстрационной настройки 5G обеспечивает 3 различных диапазона частот радиосвязи: 3,5 ГГц; 3,7 ГГц; 4,5 ГГц.

На коммуникационной станции 5-го поколения «5G DEMO ULGAM» компании Nokia, подаренной Сердаром Бердымухамедовым Институту телекоммуникаций и информатики Туркменистана, студенты проходят практические занятия по дисциплинам «5-е поколение мобильных систем связи», «Пространственно-временное кодирование в мобильных системах связи», а также получают информацию о влиянии сети 5G на здоровье человека, безопасности сети 5G в глобальных технологиях, особенностях реализации системы MIMO (многовходовая и многовыходовая), общем, национальном, международном, вход-выходном типах роуминга, работе сети 5G с виртуальными технологиями и особенностях ее использования в спутни-

ковом сегменте, особенностях маркировки и идентификации базовой сети 5G, а также о текущем состоянии стандартизации сети 5G.

Это предоставляет студентам прекрасную возможность применить полученные теоретические знания на практике, а также значительно поможет им продолжить работу в производственной сфере по своей специальности после окончания высшего образования.

Список используемых источников

1. 5G Пятое поколение мобильной связи: www.tadviser.ru (дата обращения 15.11.2025).

2. Huawei Surpasses Apple to be the second largest Smartphone Brand // URL: www.counterpointresearch.com (Accessed: 01.11.2025).

3. Lombardi, Renato. Microwave and Millimetre-wave for 5G Transport. First edition. February 2018. URL: www.etsi.org (Accessed: 01.11.2025).

FEATURES OF IMPLEMENTING 5G MOBILE COMMUNICATION TECHNOLOGY IN TURKMENISTAN

Niyazgulyeva A.M., Seyitnepesov Ch.
Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan

Technological innovations brought to the telecommunications sector by the introduction of 5G mobile technologies will increase cellular network capacity, significantly increase data transfer speeds and create opportunities to offer new types of services.

This scientific article analyzes technical solutions related to the implementation of 5G cellular communication technology in the communications sector of Turkmenistan.

Key words: 5G, Turkmenistan, telecommunications, Arkadag city, data transfer rate, Walfisch-Ikegama model, smart city, digitalization, Huawei, Nokia, MIMO, Internet of Things

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ В АМОРФНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОКСИДАХ ТАНТАЛА И НИОБИЯ

Ю. С. Остроумова[1], С. Д. Ханин[2]

[1]Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Развиваются модельные представления о природе неравновесных фазовой эволюции и структурообразования в аморфных диэлектрических оксидах тантала и ниобия. Устанавливается, что за динамику необратимых процессов, происходящих в металлооксидных структурах при катодной поляризации и длительном электротепловом нагружении в нормальном для емкостных элементов режиме, ответственны процессы транспорта в оксидах инжектируемых в них водородои кислородосодержащих ионов соответственно. Показывается, что факторами первого порядка при этом являются структурная неоднородность оксидов на мезоскопическом уровне и отклонение их состава от стехиометрического. Базируясь на результатах исследования, предлагаются технологические приемы формирования оксидного диэлектрика, ведущие к расширению функциональных возможностей емкостных элементов и к повышению временной стабильности их характеристик.

аморфные диэлектрические оксиды, фазовая эволюция, неравновесное структурообразование, ионный транспорт, структурная неоднородность, дефекты нестехиометрии, модификация технологии

Функциональное назначение аморфных оксидов тантала и ниобия как рабочего диэлектрика широкого класса, обладающих рекордно высокими удельными характеристиками конденсаторов [1-3], предопределяет интерес к природе ограничивающих функциональные возможности и временной ресурс этих элементов необратимых процессов. К таковым относятся деградационные процессы, протекающие при катодной поляризации металлооксидных структур, в силу чего рассматриваемые емкостные элементы принято считать полярными, и при длительном электротепловом нагружении в нормальном режиме. Проявлением этих процессов является ухудшение электроизоляционных свойств оксида, что приводит к катастрофическому возрастанию тока утечки.

В настоящей работе показывается, что причиной этому являются происходящие в диэлектрической пленке, предопределяемые особенностями структурной организации аморфных оксидов, неравновесные фазовая эволюция и структурообразование.

Основанием сказанного, в части возрастания тока при катодной поляризации металлооксидной структуры в контакте с рабочим электролитом конденсаторов, являются результаты структурных исследований, осуществленных с помощью ядерно-физических методов, инфракрасной спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа [4-9].

На основании данных, полученных при регистрации продуктов ядерной реакции и спектрометрии ионов отдачи при облучении опытных образцов металлооксидных структур ионами азота и кислорода с энергией приблизительно 11 МэВ, установлено, что при катодной поляризации происходит инжекция в оксид водородосодержащих ионов. С увеличением их концентрации и глубины проникновения коррелирует возрастание тока со временем при небольшом приложенном напряжении и уменьшение частоты перехода к мультиплетной прыжковой электропроводности на переменном сигнале [10, 11].

Результаты инфракрасной спектроскопии, полученные с помощью методики многократного отражения, свидетельствуют о том, что при инжекции водородосодержащих ионов происходит увеличение концентрации групп гидроксила, а данные, полученные методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии остовных электронов металла, показывают, что увеличивается концентрация катионов металла в непредельной степени окисления. Это позволяет полагать, что при катодной поляризации происходит неравновесная фазовая эволюция, состоящая в частичном восстановлении оксида по электронно-протонному механизму [11]. Последний предполагает последовательное восстановление вещества посредством перескоков протонов от образующихся в приповерхностном слое ионов гидроксила к соседним ионам кислорода с сопряженным с этим обменом валентностями между катионами металла.

Наконец, результаты рентгеноструктурного анализа опытных образцов, подвергнутых катодной поляризации, свидетельствуют об образовании в аморфных в исходном состоянии пленках кристаллов оксида металла [10, 11]. Учитывая наблюдаемое возрастание неоднородности распределения тока по площади опытных образцов, можно полагать, что неравновесное

структурообразование представляет собой термическую кристаллизацию аморфного оксида в каналах его повышенной проводимости. Это указывает на важную роль в динамике необратимых процессов сопряженной с неупорядоченностью структурной неоднородности, состоящей в наличии областей локального разрежения нанометровых размеров, что создает условия для длиннопробежной диффузии ионов, а при кристаллоподобном строении оксида в этих областях – для протекания термической кристаллизации.

За происхождение этих областей ответственны присущие неупорядоченным материалам флуктуации плотности и агрегация возникающих в силу нестехиометрии состава оксида дефектов типа оборванных связей.

При длительном электротепловом нагружении металлооксидных структур оксидных электролитических конденсаторов в нормальном режиме наблюдается рост кристаллов оксида металла, вытесняющих аморфную пленку, – так называемых полевых кристаллов [2, 12]. Для выяснения природы этого структурообразования определялся источник необходимого для роста кристаллов кислорода. С этой целью проводились изотопные исследования двух партий опытных образцов [13]. В первой партии металл оксидировался в электролите, обогащенном изотопом O^{18}, и подвергался электротепловому нагружению в контакте с электролитом нормального изотопного состава. Образцы второй серии, наоборот, оксидировались в электролите нормального изотопного состава и нагружались в электролите, обогащенном O^{18}.

Как показали результаты определения профиля распределения по толщине оксида изотопа O^{18}, у образцов первой серии содержание изотопа O^{18} в оксиде не превышает уровня фона, а у образцов второй серии оксид на всей толщине обогащен изотопом O^{18}. Это позволяет полагать, что основным источником кислорода для роста полевых кристаллов является рабочий раствор электролита, а само неравновесное структурообразование в своем генезисе вызвано транспортом кислородсодержащих ионов по направлению к базовому металлу, на поверхности которого происходит зародышеобразование полевых кристаллов.

В пользу сделанного заключения свидетельствует соответствие экспериментально установленных с привлечением методов поляризационной микроскопии и рентгенодифрактометрии зависимости степени кристалличности оксидных пленок и протекающего в конденсаторной структуре тока на стадии радиального роста кристаллов от времени модели двумерного роста кристаллов на заданном числе центров [14].

Важным фактором, влияющим на динамику необратимого структурообразования здесь, как и при катодной поляризации, является отмеченная выше структурная неоднородность аморфного оксида на мезоскопическом уровне. Существенную роль при этом играют дефекты нестехиометрии в аморфном оксиде. Указанием на это, в частности, являются данные об ускорении процесса электростимулированного роста кристаллов в оксиде, подвергнутом восстановительной термообработке.

Представленная в работе физическая картина неравновесных фазовой эволюции структурообразования в аморфных диэлектрических оксидах тантала и ниобия явилась основанием для изыскания технологических приемов, направленных на управление динамикой этих процессов с целью расширения функциональных возможностей и повышения долговременной стабильности эксплуатационных свойств емкостных элементов. Базируясь на полученных результатах, был сделан вывод о том, что достижению указанных целей может способствовать повышение однородности структуры диэлектрика на мезоскопическом уровне ее организации и уменьшение степени нестехиометрии состава.

В этой связи в качестве целесообразной предложена модификация технологии формирования оксидного диэлектрика, состоящая в интеграции в нее постростовой восстановительной термообработки оксида с последующим реоксидированием базового металла. Предполагалось, что термообработка будет способствовать гомогенизации атомной структуры, а реоксидирование – ликвидации возникающих при термообработке дефектов нестехиометрии, причем наиболее интенсивно, в силу специфики процесса электрохимического оксидирования, в местах структурных неоднородностей.

О правомерности этого предположения свидетельствует обнаруживаемое методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии уменьшение плотности электронных состояний в запрещенной зоне оксида [15]. В части процессов, протекающих при катодной поляризации, дополнительным положительным фактором является то, что при восстановительной термообработке происходит растворение кислорода в базовом металле, что должно приводить к увеличению работы выхода электронов из него [16] и, как следствие, к уменьшению электронного инжекционного тока [17].

Другой предлагаемый технологический прием формирование оксида с участием сильного окислителя, например, перекиси водорода, как на этапе электрохимического оксидирования металла, так и постростового термиче-

ского воздействия. При этом, наряду с уменьшением концентрации катионов металла в непредельной степени окисления, как указывают данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии валентных и остовных электронов металла основы, происходит, по-видимому, и повышение однородности структуры аморфного диэлектрика. Об этом свидетельствует, в частности, наблюдаемое изменение зависимости неомической проводимости оксида от напряженности электрического поля, а именно практическое исчезновение характерного для изучаемых материалов падения проводимости с ростом напряженности поля [18].

Интерес представляет и влияние на протекающий при катодной поляризации ток фторидных добавок в формирующий электролит. Как показывают данные вторичной ионной масс-спектрометрии, фтор сосредотачивается в оксиде вблизи межфазовой границы раздела с базовым металлом, что может приводить к образованию в этой области отрицательного объемного заряда и ограничивать таким образом электронный инжекционный ток.

Отметим, что к уменьшению протекающего тока при катодной поляризации металлооксидной структуры, в силу увеличения работы выхода электронов из базового металла (тантала, ниобия) приводит легирование последнего элементами 6-й группы периодической таблицы (молибденом, фольфрамом) [19].

Наконец, сочетание указанных технологических приемов, например, термоударной формовки оксида в электролите с добавкой сильного окислителя. Осуществленная апробация на опытных образцах указанных технологических приемов показала, что их использование действительно приводит к положительному в рассматриваемом аспекте результату. Наиболее существенный эффект дает сочетание режима термоударной формовки с воздействием сильного окислителя.

Список использованных источников:

1. Закгейм Л. Н. Электролитические конденсаторы. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 284 с.

2. Ханин С. Д. Проблемы электрофизики металлооксидных конденсаторных диэлектриков. М.: Обзоры по электронной технике, сер. 5 «Радиодетали и радиокомпоненты», 1990, вып. 1. 80 с.

3. Freeman Yu. Tantalum and Niobium-based Capacitors: Science, Technology and Application. Springer, 2018. 120 p.

4. Гусинский Г. М., Кудрявцев И. В., Найденов В. О., Рассадин Л. А. Исследование распределения водорода в приповерхностных слоях // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, 1988. № 1253. 18 с.

5. Гусинский Г. М., Муждаба В. М., Томиленко Г. Ф., Ханин С. Д. Определение содержания водорода в аморфном оксиде тантала с помощью ядерных реакций // Журнал технической физики, 1986. Т. 56. № 1. С. 204-206.

6. Дьяконов М. Н., Костиков Ю. П., Костров Д. В., Ханин С. Д. Исследование электронных состояний окислов тантала и ниобия методом электронной спектроскопии // Известия АН СССР. Неорганические материалы, 1980. Т. 16. № 5. С. 881–884.

7. Костиков Ю. П., Костров Д. В., Томиленко Г. Ф., Ханин С. Д. Низковалентные катионы и электронные свойства оксидов ниобия и тантала // Журнал технической физики, 1983. Т. 53. № 11. С. 2189–2194.8. Алешина Л. А. Рентгенографическое исследование структуры аморфных оксидных пленок тантала, ниобия и вольфрама: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 /Алешина Людмила Александровна. Петрозаводск, 1982. 142 с.

9. Aleshina L.A., Malinenko V.P., Phophanov A.D., Yakovleva N.M. The Short-Range Order of Anodic Oxide Films // Journ. Non-Cryst. Solids, 1996. Vol. 87. № 2. P. 350-360.

10. Гусинский Г. М., Карпухина Л. Г., Муждаба В. М., Найденов В. О., ТомиленкоГ. Ф., Ханин С. Д. Протонно-инжекционные явления в аморфном оксиде тантала // Физика твердого тела, 1987. Т. 29. № 11. С. 3253–3257.

11. Физика и технология наноструктурированных функциональных материалов: монография / под ред. С. Д. Ханина и Ю. А. Кузнецова. СПб.: Изд-во Военной академии связи, 2023. 392 с.

12. Одынец Л. Л., Орлов В. М. Анодные оксидные пленки. Л.: Наука, 1991. 200 с.

13. Коварский А. П., Новотельнова А. В., Ханин С. Д., Чернюс Н. Л. Исследование процесса электростимулированного роста кристаллов в системе металл–аморфный оксид–электролит методом вторичной ионной масс-спектрометрии // Журнал технической физики, 1988. Т. 58. № 2. С. 415–418.

14. Колмогоров А. Н. К статистической теории кристаллизации металлов // Изв. АН СССР, сер. Математическая, 1937. Т. 3. № 3. С. 355–359.

15. Khanin S.D., Ivanovskii A.L. The Influence of Structural Defects on the Electronic Properties of Amorfous Ta_2O_5 // Phys.Stat.Sol.(b), 1992. V. 174. № 2. P. 449-461.

16. Кобяков В. П., Минадзе Н. Е., Сиренко А. М., Ццхладзе Д. Л. Работа выхода кислородосодержащего ниобия // Поверхность. Физика, химия, механика, 1987, № 2. С. 137–145.

17. Khanin S.D. Strong-Field Effects in Disordered Dielectrics with Hopping Conduction // IEE Sixth International Conference on Dielectric Material. Measurements and Applications: Conference Publication, 1992. № 363. P. 454-459.

18. Физика неупорядоченных и наноструктурированных оксидов и халькогенидов металлов / под ред. Г. А. Бордовского. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. 382 с.

19. Александрова И. В., Бочарова В. И., Евсеева Р. П., Ханин С. Д., Чернец Н. Л. Примеси и инжекционные токи в аморфных оксидах металлов // Журнал технической физики, 1987. Т. 57. № 6. С. 1394–1396.

THE PHYSICAL PICTURE OF IRREVERSIBLE PROCESSES IN AMORPHOUS DIELECTRIC OXIDES TANTALUM AND NIOBIUM

Ostroumova Yu.[1], Khanin S.[2]
[1] Military Medical Academy named after S. M. Kirov
[2] The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Model concepts of the nature of nonequilibrium phase evolution and structure formation in amorphous dielectric tantalum and niobium oxides are being developed. It is established that the processes of transport in oxides of hydrogen- and oxygen-containing ions injected into them, respectively, are responsible for the dynamics of irreversible processes occurring in metal oxide structures during cathodic polarization and prolonged electrothermal loading in the normal mode for capacitive elements. It is shown that the first-order factors in this case are the structural heterogeneity of oxides at the mesoscopic level and the deviation of their composition from the stoichiometric one. Based on the results of the study, technological methods for the formation of an oxide dielectric are proposed, leading to an expansion of the functionality of capacitive elements and to an increase in the temporal stability of their characteristics.

Key words: amorphous dielectric oxides, phase evolution, nonequilibrium structure formation, ion transport, structural heterogeneity, nonstoichiometry defects, technology modification

УДК 531.5
ГРНТИ 29.05.09

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ЗАДАЧЕ О СВОБОДНОМ ПАДЕНИИ ТЕЛА С БОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ

Ф. Ф. Павлов, В. Б. Федюшин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Настоящая статья посвящена аналитическому решению и детальному анализу фундаментальной задачи классической механики с учетом закона всемирного тяготения Ньютона: задача о радиальном падении тела с большой высоты, где исследуется отличие времени падения от результата, полученного в приближении постоянного ускорения свободного падения. Представлена интегрируемость уравнений радиального свободного падения в неоднородном поле тяготения Земли, т.е. возможность найти их решение в явном виде через элементарные функции. Материал представлен в виде технической заметки для студентов, специализирующихся в области аналитической и небесной механики.

закон всемирного тяготения, ускорение свободного падения, сила тяжести

В отличие от стандартных учебных курсов в данной статье основное внимание уделяется нетривиальным и изящным решениям, которые часто остаются за рамками базовых пособий. Цель статьи – расширить кругозор читателя, продемонстрировать глубину и взаимосвязь физических принципов в, казалось бы, хорошо изученных задачах. Приведенные решения дополняют стандартный учебный материал и демонстрируют эффективность комбинирования различных физических и математических подходов.

Как известно, ускорение свободного падения g уменьшается с высотой h по формуле:

$$g = g_0 \left(\frac{R}{R+h}\right)^2 = g_0 \left(1 - 2\frac{h}{R} + 3\frac{h^2}{R^2} + O\left(\frac{h^3}{R^3}\right)\right), \text{при } \frac{h}{R} \ll 1, \qquad (1)$$

где g_0 = 9,8 м/с² – значение на поверхности Земли, $R \approx 6371$ км – радиус Земли. Для наглядности ниже приведена табл. 1 для различных высот, из которой видно, что на малых высотах (1–10 км) изменение пренебрежимо мало и часто игнорируется в расчетах, а на высоте 100 км над поверхностью

Земли ускорение свободного падения g уменьшается примерно на 3 % по сравнению с поверхностным значением g_0. Эта высота соответствует краю космоса (линия Кармана), где гравитационное ускорение слабее, но все еще значительно. На больших высотах (1000 км) эффект становится существенным.

ТАБЛИЦА 1. Изменение ускорения свободного падения

Высота h, км	Уменьшение g/g_0	Относительное изменение (уменьшение) $\Delta g/g_0$, %
1	0,9997	0,03
10	0,9969	0,31
50	0,9845	1,55
100	0,9693	3,07
500	0,8598	14
1000	0,7471	25
10000	0,1514	84,85
50000	0,0128	98,72
100000	0,0036	99,64
384400 (расстояние до Луны)	0,000266	99,97

Рассмотрим задачи о свободном падении тела с высоты h и о нахождении периода математического маятника в однородном и неоднородном поле силы тяжести, пренебрегая сопротивлением воздуха, вращением Земли и вызванными им эффектами (силой Кориолиса и центробежной силой).

I. Падение в однородном поле.

Вначале приведем случай падения тела в однородном поле тяжести. Пусть тело брошено вертикально вниз без начальной скорости с высоты h_0 над землей. В момент времени $t = 0$ оно начинает свободно падать в однородном поле тяжести с постоянным ускорением свободного падения $g_0 = G\frac{M}{R^2} = 9{,}8\ \text{м/с}^2$, где G – гравитационная постоянная, M и R – масса и радиус Земли. К некоторому моменту времени t тело достигло высоты h над землей ($h \le h_0$). Основные кинематические формулы для данной задачи хорошо известны и приведены ниже.

Используя теорему о изменении кинетической энергии

$$\frac{mv^2}{2} = mg_0(h_0 - h),$$

находим скорость тела к моменту времени t:

$$v(t) = g_0 t = \sqrt{2g_0(h_0 - h)}, \quad (2)$$

высоту h:

$$h(t) = h_0 - \frac{g_0 t^2}{2} = h_0 - \frac{v^2}{2g_0}, \quad (3)$$

и время полета t с высоты h_0 до высоты h:

$$t = \sqrt{\frac{2(h_0 - h)}{g_0}} = \frac{v}{g_0}. \quad (4)$$

II. Падение в неоднородном поле.

Решим теперь задачу, когда тело начинает радиально падать к центру Земли в неоднородном поле тяжести с ускорением $g = G\frac{M}{r^2}$ (см. рис. 1).

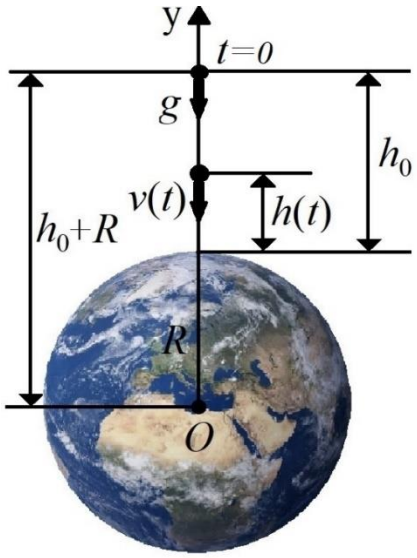


Рис. 1. Свободное падение тела с высоты h_0 в неоднородном поле тяжести

Уточним систему координат. Выберем ось y вертикально вверх, начало координат в центре Земли. Начальная координата равна $y_0 = y(t = 0) = R + h_0$, координата y в момент времени t равна $y(t) = R + h(t)$.

Используя теорему о изменении кинетической энергии

$$\frac{mv^2}{2} = GmM\left(\frac{1}{R+h} - \frac{1}{R+h_0}\right),$$

и заменяя $GM = g_0R^2$, получим выражение для скорости v как функции h:

$$v = \sqrt{\frac{2g_0(h_0-h)}{\left(1+\frac{h}{R}\right)\left(1+\frac{h_0}{R}\right)}}, \qquad (5)$$

Чтобы найти время полета t с высоты h_0 до высоты h нужно вычислить интеграл

$$t = \int_0^t dt = -\int_{h_0}^{h} \frac{dh}{v} = -\int_{h_0}^{h} \sqrt{\frac{\left(1+\frac{h}{R}\right)\left(1+\frac{h_0}{R}\right)}{2g_0(h_0-h)}}\,dh.$$

Окончательно получаем

$$t = \frac{\sqrt{R+h_0}}{R\sqrt{2g_0}}\left[\sqrt{h_0-h}\sqrt{R+h} + \frac{R+h_0}{2}\cdot arccos\left(1-2\frac{h_0-h}{R+h_0}\right)\right]. \qquad (6)$$

Появление арккосинуса в формуле для времени падения – это прямое математическое следствие зависимости силы тяготения от расстояния по закону обратных квадратов. Падающее тело по прямой – это частный случай кеплерова движения (вырожденный эллипс с эксцентриситетом $e = 1$), где фокус находится в центре Земли. Время движения по такому эллипсу связано с угловыми параметрами (эксцентрической аномалией), что и дает тригонометрические функции [1].

Нетрудно заметить, что на малых высотах при $h/R << 1$ и $h_0/R << 1$, разлагая в ряд $\arccos(1-z) \approx \sqrt{2z} = 2\sqrt{\frac{h_0-h}{R+h_0}}$ при $z = 2\frac{h_0-h}{R+h_0}$ стремящимся к нулю [2], формула (6) переходит в известную формулу (4): $t = \frac{\sqrt{2(h_0-h)}}{\sqrt{g_0}}$.

Решая трансцендентное уравнение (6) можно найти высоту $h(t)$ как функцию времени

$$h = \frac{h_0-R}{2} + \frac{h_0+R}{2}\cdot cos\,x(t), \qquad (7)$$

где $x(t)$ – решение трансцендентного уравнения

$$sin\,x + x = \frac{2\sqrt{2g_0}Rt}{(R+h_0)^{3/2}}. \quad (8)$$

При $x << 1$ и $h_0/R << 1$ формула (8) принимает вид $\sin(x) + x \approx 2x = \frac{2\sqrt{2g_0}t}{\sqrt{R}}$. Тогда, подставляя полученное выражение для x в (7) и учитывая, что $\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2!} = 1 - \frac{g_0 t^2}{R}$, получим $h = h_0 - \frac{g_0 t^2}{2} - \left(\frac{h_0}{R}\right)\frac{g_0 t^2}{2} \approx h_0 - \frac{g_0 t^2}{2}$, что совпадает с известной формулой (3).

В табл.2 приведено сравнение времен падения (4) и (6) в однородном и неоднородном поле тяжести в зависимости от высоты h_0 (тело летит до поверхности Земли, поэтому $h = 0$).

ТАБЛИЦА 2. Сравнение времен падения в однородном и неоднородном поле тяжести

Высота h_0, км	Время падения t_0 в однородном поле тяжести	Время падения t в неоднородном поле тяжести	t/t_0	Относительное изменение (увеличение) $\Delta t/t_0$, %
50	1 мин. 41 с.	1 мин. 42 с.	1	0,65
100	2 мин. 23 с.	2 мин. 25 с.	1,01	1,3
500	5 мин. 19 с.	5 мин. 40 с.	1,06	6,5
1000	7 мин. 32 с.	8 мин. 31 с.	1,13	13
10000	23 мин. 48 с.	54 мин. 12 с.	2,28	128
50000	53 мин.	6 ч. 26 мин.	7,25	625
100000	1 ч. 15 мин.	16 ч. 52 мин.	13,44	1244
384400	2 ч. 28 мин.	119 ч. 23 мин.	48,53	4753

В реальной атмосфере время падения с высоты 50 км составляет от 4,5 до 6 минут. Точное время зависит от аэродинамических свойств тела (массы, формы, площади поперечного сечения). Наглядный пример – рекордный прыжок Алана Юстаса (Red Bull Stratos) в 2014 г. с высоты около 41,4 км из стратосферы длительностью (до раскрытия парашюта) 4 минуты 27 секунд.

На рис. 2 приведены сравнительные графики зависимости высоты h от времени t для однородного и неоднородного поля тяжести Земли при различных начальных высотах h_0.

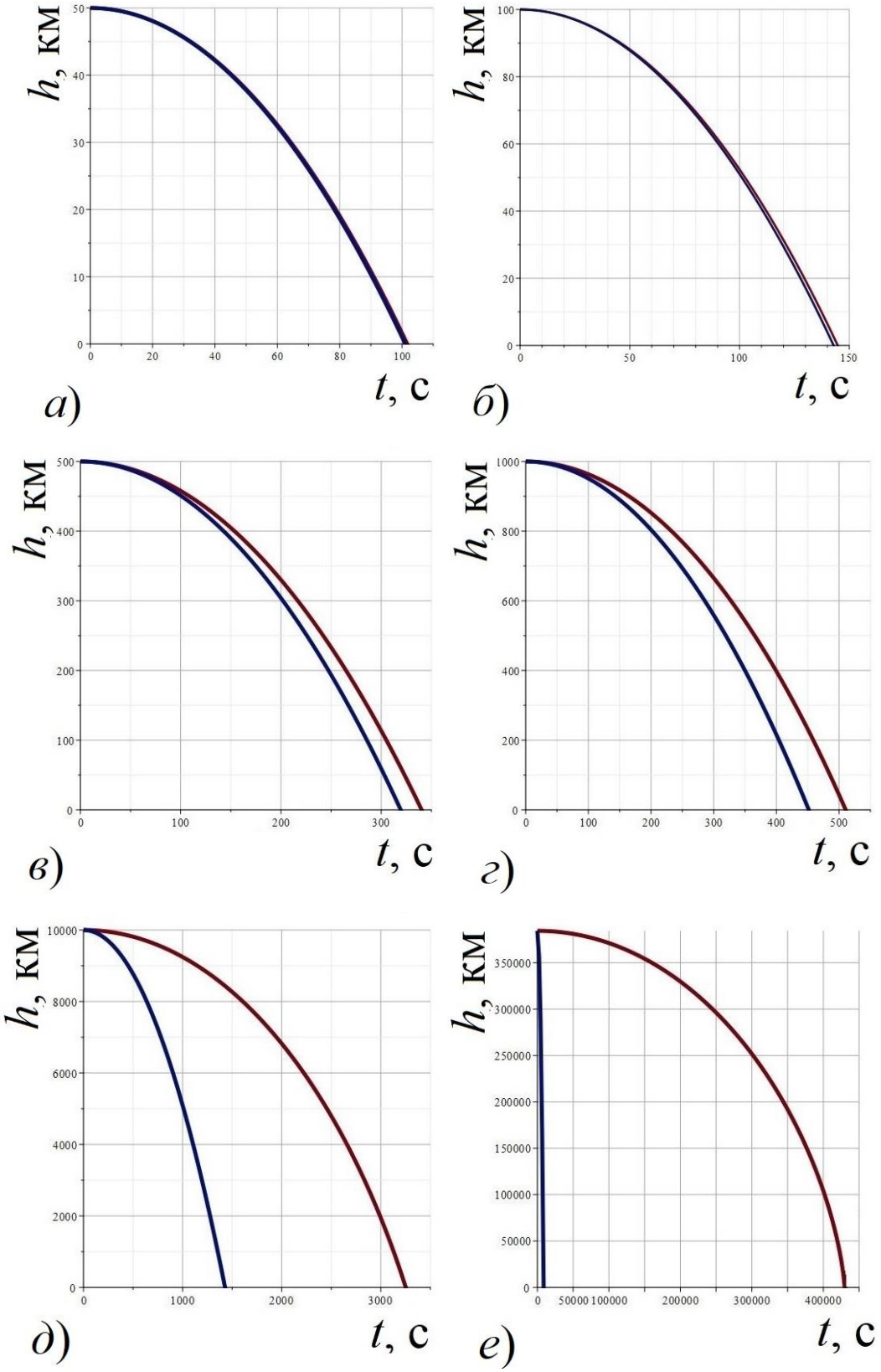


Рис. 2. Зависимость высоты h (км) от времени t (с) при свободном падении тела в однородном (синяя линия) и неоднородном (красная линия) поля тяжести Земли с начальной высоты h_0: *а*) 50 км, *б*) 100 км, *в*) 500 км, *г*) 1000 км, *д*) 10000 км, *е*) 384400 км

Точные уравнения с учетом закона всемирного тяготения содержат трансцендентные уравнения и выражают скорость, время и высоту через радиус Земли R. Приближенные уравнения для $h << R$ и $h_0 << R$ совпадают с классическими формулами для постоянного g_0. Для практических расчетов падения с больших высот (например, из космоса) необходимо использовать точные уравнения или их численное интегрирование. Если начальная высота менее 1 % радиуса Земли (~ 64 км), погрешность будет меньше 2 %. Для большинства земных задач (самолеты, парашютисты, здания) этого достаточно. Для космических объектов – нет. Именно поэтому для расчетов падения метеоритов, спуска космических аппаратов, баллистики межконтинентальных ракет используются точные уравнения или численные методы. Кроме того, существуют дополнительные факторы в реальных расчетах, такие как атмосферное сопротивление, вращение и несферичность Земли.

В заключении следует отметить, что хотя решение данных задач входит в стандартную программу подготовки студентов-физиков, и любой студент физического факультета может их решить, мы сочли необходимым включить их в данную работу, так как это позволит выстроить единую, самодостаточную методическую линию изложения, обеспечивая его полноту и логическую стройность.

Список используемых источников

1. Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел. М. Наука, 1972, 360 с.
2. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М. Наука, 1973, 228 с.

ACCOUNTING FOR THE NON-UNIFORMITY OF EARTH'S GRAVITY IN THE PROBLEM OF FREE FALL FROM A BODY FROM A GREAT HEIGHT

Pavlov F. F., Fedushin V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper is devoted to the analytical solution and a detailed analysis of a fundamental problem in classical mechanics under Newton's law of universal gravitation: the radial fall of a body from a large altitude, focusing on the deviation of the fall time from the result obtained under the constant gravitational acceleration approximation. The integrability of the equations of radial free fall in the Earth's non-uniform gravitational field is demonstrated, i.e., the possibility of obtaining their explicit solution in terms of elementary functions. The material is presented as a technical note for students specializing in analytical and celestial mechanics.

Key words: law of universal gravitation, acceleration due to gravity, force of gravity

УДК 621.396.24
ГРНТИ 49.33.29

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В РАДИОКАНАЛАХ СОТОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ

Ч. Сейитнепесов, Б. Г. Уссаев

Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана

Измерения характеристик распространения радиосигналов сотовых сетей в зонах обслуживания систем сотовой связи второго и третьего поколений, работающих в поселке Хасан Балканского велаята, проводились в осенние месяцы 2024 года с использованием мобильного телефона Samsung S21 с установленным программным пакетом NetMonitor и спектроанализатора Rohde&Schwarz R&S®FSH8. В результате измерений характеристик распространения сигналов сотовых радиосетей второго и третьего поколений в поселке Хасан было установлено, что локальные нестабильности в зонах уверенного приема, обусловленные локальными симметричными отражениями радиосигналов над водой, оказывают существенное влияние на качественные показатели сотовой сети.

системы сотовой связи, распространение радиоволн, прибрежные районы, Каспийское море, интерференция, замирания сигналов, базовые станции, второе и третье поколения связи, влажность воздуха, планирование сетей

В Туркменистане, признанный страной со стабильной и надежной стратегией развития, под руководством президента Туркменистана Сердара Бердымухамедова реализуются крупные проекты, представляющие международный интерес. Исходя из задач, поставленных Президентом перед отраслью связи, проводятся широкомасштабные работы по развитию и модернизации телекоммуникационной сети страны, укреплению ее материально –технической базы и созданию региональной системы передачи данных.

Современное развитие технологий мобильной радиосвязи выдвигает важность проведения исследований характеристик распространения сигналов в радиоканалах сотовых сетей. Эти исследования также актуальны для оптимального решения задач электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. При наличии объектов в зонах обслуживания систем сотовой связи, отражающих радиоволны, их затухание увеличивается в ре-

зультате многолучевого распространения, а его точное значение существенно варьируется в зависимости от географического рельефа зоны обслуживания и расположения жилых зданий и сооружений [1-5].

Как известно, молекулы атмосферных газов и водяного пара частично поглощают энергию радиоволн, распространяющихся в атмосфере. В таких средах энергия радиоволн сильнее поглощается молекулами водяного пара, чем другими газами. Поглощение энергии радиоволн молекулами кислорода и водяного пара в атмосфере всегда присутствует в той или иной степени и становится более выраженным на высоких частотах, начиная с частоты 10 ГГц.

В прибрежных районах, из-за отсутствия геометрических препятствий на поверхности водоемов, отражающих радиоволны, поглощение радиоволн происходит более медленно по сравнению с сушей в зависимости от расстояния. Однако при распространении радиоволн над водой они могут создавать значительные отраженные сигналы в результате образования на воде симметричных отражений. Это явление, в свою очередь, приводит к интерференции прямых и отраженных сигналов систем сотовой связи, создавая локальные «зоны замирания» радиосигналов. В свою очередь, температура и соленость воды в определенной степени также влияют на характеристики распространения радиоволн в прибрежных районах.

Таким образом, учитывая особенности распространения радиоволн сотовых радиосетей в прибрежных зонах обслуживания, проведение измерений распространения сигналов в сотовых радиосетях имеет большое значение.

В данной работе представлены результаты измерений характеристик распространения сигналов в каналах сотовых радиосетей 2G и 3G, расположенных в поселке Хасан Балканского велаята. Для проведения измерений были использованы спектроанализатор Rohde & Schwarz R&S®FSH8 и мобильный телефон Samsung S21, с установленным программным пакетом NetMonitor. Спектроанализатор Rohde & Schwarz R&S®FSH8 предназначен для измерения спектральных характеристик различных источников радиосигналов в широком диапазоне частот от 9 кГц до 8 ГГц и его краткие технические характеристики приводятся ниже [6]:

– рабочий диапазон частот: от 9 кГц до 8 ГГц;
– чувствительность: от -141 дБмВт до -161 дБмВт;
– полоса анализа: от 1 ГГц до 20 МГц;
– погрешность измерения: не более 1 дБ;

– фазовый шум: от -95 дБнВт до -105 дБнВт (на 1 ГГц);
– динамический диапазон: более 80 дБ;
– вес: 3 кг;
– тип дисплея: 6,5 – дюймовый цветной ЖК-дисплей с анализом VGA.

Поселок Хасан расположен вблизи побережья Каспийского моря окружен морем с запада и севера. Из-за влияния влажных ветров, дующих с Каспийского моря в поселке Хасан отмечается высокий уровень влажности воздуха. Таким образом, поселок Хасан наиболее подходит для изучения особенностей распространения сигналов сотовых систем связи в прибрежных районах.

Как показали экспериментальные измерения, достаточная мощность сигнала от базовых станций 2G и 3G, установленных в поселке Хасан, наблюдается в радиусе до 5-6 км от базовых станций. При дальнейшем увеличении расстояния потери принимаемых сигналов начинают резко увеличиваться, а на расстоянии около 9 км сигнал становится нестабильным. В радиусе 5-6 км также наблюдаются нестабильные изменения мощности принимаемых сигналов из-за влияния моря. Особенно ярко это явление проявляется осенью. График зависимости средней мощности сигналов в зависимости от расстояния в радиоканалах сотовой сети 3G поселка Хасан приводится ниже (рисунок 1).

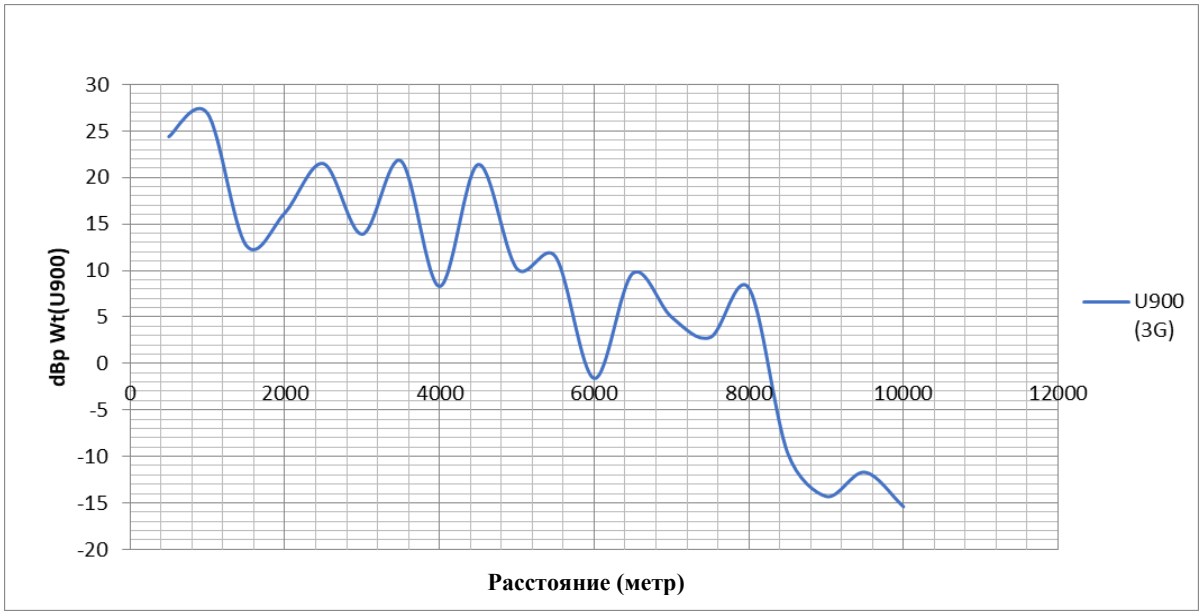


Рис. 1. Зависимость средней мощности сигнала в радиоканалах сотовой сети 3G поселка Хасан от расстояния до базовых станций

Скорости интернет-потоков измерялись отдельно в трех секторах антенн базовых станций на расстоянии 200 метров от пункта связи. Скорость

интернет-потоков соответственно в первом секторе антенн составила 6,80 Мбит/с, во втором секторе – 6,87 Мбит/с, в третьем секторе – 6,74 Мбит/с. В ходе тестовых измерений перегрузки пункта связи не наблюдались.

Возникновение локальных нестабильностей сигналов в зонах уверенного обслуживания систем сотовой связи 2G и 3G данной местности наиболее вероятно связаны с возникновением симметричных отражений радиоволн от поверхности Каспийского моря.

На основании данных, полученных в результате проведенных измерений, было определено, что пропускная способность будущих станций мобильной связи в районах с повышенным уровнем влажности и прибрежных населенных пунктах должны быть установлены на ≈ 20 % выше, чем на равнинных территориях. Определено так же, что для таких территорий частотно – территориальное планирование базовых станций мобильной связи с рабочими частотами, не выходящими за пределы диапазона частот 900-1800 МГц, позволит обеспечить население на достаточном уровне услугами широкополосной сотовой связи.

Основные результаты

Измерения характеристик распространения радиосигналов сотовых сетей в зонах обслуживания систем сотовой связи 2G и 3G, работающих в поселке Хасан Балканского велаята, проводились в осенние месяцы 2024 года с использованием мобильного телефона Samsung S21 с установленным программным пакетом NetMonitor и спектроанализатора Rohde&Schwarz R&S®FSH8.

Определена связь между средней мощностью отраженных сигналов в секторах антенны базовой станции сотовой сети 3G поселка Хасан и скоростью интернет – трафика. В 1-м секторе антенны скорость интернет – трафика составила 6,80 Мбит/с, во 2-м секторе – 6,87 Мбит/с, в 3–м секторе – 6,74 Мбит/с. Относительно невысокая скорость интернет – трафика во всех секторах антенны и возникновение локальных флуктуаций сигнала в пределах зоны обслуживания объяснены влиянием Каспийского моря.

В результате измерений характеристик распространения сигналов сотовых радиосетей 2G и 3G в поселке Хасан было установлено, что локальные нестабильности в зонах уверенного приема, обусловленные локальными симметричными отражениями радиосигналов над водой, оказывают существенное влияние на качественные показатели сотовой сети.

Список используемых источников

1. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи. М: Горячая линия – Телеком, 2006. С. 112-118.
2. Nokerov S.M., Khan Khalid Ali, Seyitnepesov Ch., Pirliyev D. G. Study of the 3G UMTS – 2100 cellular radio networks characteristics in the western part of Ashgabat. Современные средства связи, материалы XXV меж. науч. – техн. конф., 22 – 23 октября 2020 года, Минск, 2020, с 66-67.
3. Бабаев Б. Сейитнепесов Ч. Исследования влияния архитектурных особенностей Ашгабада на затухания сигналов сотовых радиосетей. Современные средства связи – 2020: материалы XXV меж. науч.-техн. конф., 22 – 23 октября 2020 года, Минск, 2020. С. 18.19.
4. NetMonitor. URL: https://www.net-monitor.net (дата обращения: 26.02.2026).
5. Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G, Mishra, Ajay R. 2020.
6. Приемник измерительный портативный R&S®FSH8. Руководство по эксплуатациию. Департамент радиомониторинга и специальных технических средств. ROHDE&SCWARZ GmbH & Co. KG. 2022.

SPECIFIC FEATURES OF SIGNAL PROPAGATION IN CELLULAR COMMUNICATION RADIO CHANNELS IN COASTAL AREAS

Seyitnepesov Ch., Ussayev B.
Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan

Measurements of the propagation characteristics of cellular network radio signals in the service areas of second and third generation cellular communication systems operating in the village of Khasan, Balkan Velayat, were conducted during the autumn months of 2024. The study utilized a Samsung S21 mobile phone with the NetMonitor software package installed and a Rohde&Schwarz R&S®FSH8 spectrum analyzer. As a result of measuring the signal propagation characteristics of second and third generation cellular radio networks in Khasan, it was established that local instabilities in reliable reception zones, caused by local symmetric reflections of radio signals over water, have a significant impact on the quality indicators of the cellular network.

Key words: cellular communication systems, radio wave propagation, coastal areas, Caspian Sea, interference, signal fading, base stations, second and third generation communications, air humidity, network planning

УДК 621.396
ГРНТИ 47.05.09

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕХ

В. С. Усс, В. Т. Хоанг

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В современных логистических системах все большую популярность приобретают роботизированные платформы – автономные мобильные роботы (АМР), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с электромагнитными помехами различного происхождения, что критически влияет на надежность каналов связи и безопасность доставки. В работе представлен систематический анализ источников помех в транспортной логистике и проведен сравнительный анализ существующих методов защиты от помех, включая расширение спектра, адаптивное формирование луча, когнитивное радио и методы на основе искусственного интеллекта.

роботизированные платформы, автономные мобильные роботы, беспилотные летательные аппараты, электромагнитные помехи, управление, транспортная логистика

В ближайшем будущем применение наземных и воздушных роботов для доставки грузов будет экспоненциально расти. Беспилотные наземные и летательные аппараты станут неотъемлемой частью логистической отрасли, обеспечивая гибкую, экономичную и эффективную доставку грузов, мониторинг складов и управление цепочками поставок. Согласно последним данным (рис. 1), рынок логистики с использованием одних только БПЛА демонстрирует нелинейный рост, что подчеркивает их растущую роль в автоматизации процессов.

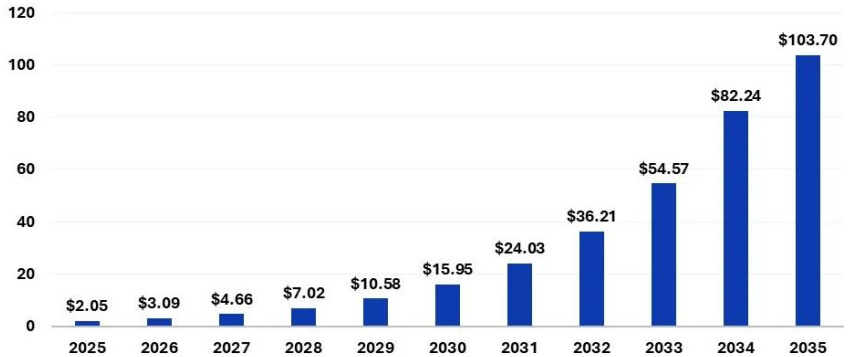


Рис. 1. Мировой рынок логистики, транспорта дронов 2025–2035г (в млрд долларов) [2]

Однако в реальных условиях эксплуатации данные платформы сталкиваются с серьезными вызовами, обусловленными работой в сложных электромагнитных условиях промышленных помех (высоковольтные ЛЭП, сотовая связь и т. п.). Это приводит к уязвимости каналов управления, вызванной снижением отношения сигнал/шум, потерей связи и радионавигации или даже авариями. Таким образом, исследование в области устойчивости к помехам логистических роботизированных платформ приобретает существенное значение для обеспечения безопасности, надежности и экономической эффективности логистических систем, особенно в контексте растущего спроса на быструю и автоматизированную доставку.

Результаты анализа работ [1–8] обобщены в таблице 1, где представлена сравнительная классификация основных источников помех для систем управления.

ТАБЛИЦА 1. Классификация помех, влияющих на сигналы управления БПЛА в области транспортной логистики

Виды помех	Описание	Влияние на сигнал управления	Диапазон частот, подверженных влиянию	Уровень угрозы в логистике
Внутренние помехи	Помехи от двигателей, камер, DC/DC, источников питания, других электронных модулей	Снижение отношения сигнал/шум, ошибки в битах, потеря связи с GPS/Wi-Fi, потери ориентации, падение (БПЛА), прекращение миссии	100 МГц – 3 ГГц двигатели создают помехи в МГц-диапазоне, камеры – в ГГц; часто затрагивает GPS 1,2-1,6 ГГц и Wi-Fi 2,4/5ГГц	Высокий
Помехи от окружающей среды	Помехи от гроз, дождя, тумана, городской местности, радиочастотных помех от Солнца	Ослабление сигналов GPS/сотовой связи, увеличение ошибок позиционирования, задержки в управлении	1-10 ГГц солнечные помехи в МГц-ГГц; дождь/туман сильно влияют на 5-60 ГГц для мм-волн 5G	Средний
Помехи от инфраструктуры	Помехи от башен сотовой связи, точек доступа Wi-Fi, радаров аэропортов, линий электропередач высокого напряжения	Снижение отношения сигнал/шум, потеря связи с сотовой сетью/Wi-Fi	700-2600 МГц (сотовый LTE), 2,4/5 ГГц (Wi-Fi), 1-10 ГГц (радары аэропортов)	Высокий
Преднамеренное глушение	Глушение от устройств-РЭБ	Полное блокирование сигнала, потеря ориентации, падение	1,2-1,6 ГГц (спуфинг GPS), 2,4/5 ГГц (глушение Wi-Fi), 700-	Высокий

Виды помех	Описание	Влияние на сигнал управления	Диапазон частот, подверженных влиянию	Уровень угрозы в логистике
		(БПЛА), прекращение работы	2600 МГц (глушение сотовой связи)	
Помехи от других БПЛА	Помехи от роя, использующих общую полосу частот (межканальные помехи)	Снижение пропускной способности, увеличение задержек в групповом управлении БПЛА	2,4/5,8 ГГц (диапазоны ISM для роев), 700-2600 МГц (сотовые для множественных платформ)	Средний

Данная таблица предоставляет обзор основных источников помех, подчеркивая их разнообразие в логистических условиях. Анализ показывает, что помехи от инфраструктуры и преднамеренное глушение преимущественно затрагиваю частотный диапазон ниже 3 ГГц.

Чтобы противостоять этим вызовам и повысить устойчивость систем управления логистическими робототехническими платформами, разработаны специализированные методы защиты, которые позволяют значительно снизить влияние помех на логистические операции.

Проанализировав работы [9-14], можно выделить ключевые методы защиты БПЛА от помех в транспортной логистике (таблица 2). Детальное сравнение этих методов позволяет оценить их применимость в различных сценариях транспортной логистики:

1. Метод расширения спектра путем случайного переключения частот между каналами для избежания фиксированных или динамических помех, используя псевдослучайные последовательности для синхронизации между БПЛА и станцией управления;

2. Расширение сигнала управления путем умножения на псевдослучайный код высокой скорости, делая сигнал широкополосным для борьбы с узкополосными помехами; восстановление исходного сигнала путем повторного умножения на код на стороне приемника;

3. Использование массива антенн для фокусировки сигнала управления в желаемом направлении и создания провала диаграммы направленности в направлении источника помех, на основе адаптивных алгоритмов;

4. Обнаружение каналов с помехами с помощью датчиков спектра и переход на чистые каналы; использование простого искусственного интеллекта для прогнозирования свободного спектра;

5. Использование обучения с подкреплением для самостоятельного выбора каналов и мощности БПЛА на основе вознаграждений от успешной передачи сигналов;

6. Использование адаптивных фильтров для удаления помех из принимаемого сигнала на основе оценки помех.

В таблице 2 представлены сравнение различных методов защиты от помех для роботизированных платформ в логистике от расширения спектра частот до адаптивной фильтрации, где каждый метод балансирует между эффективностью противодействия помехам и требованиями к ресурсам.

ТАБЛИЦА 2. Преимущества и недостатки существующих методов защиты БПЛА от воздействия помех в области транспортной логистики

Метод	Преимущества	Недостатки
Расширение спектра с частотной перестройкой	Легко внедряется с низкими затратами, не требует сложного оборудования; улучшает надежность сигнала в условиях сильных помех	Может подвергаться влиянию широкополосных помех; требует точной синхронизации между сторонами, что приводит к задержкам при слишком быстром переключении частот
Расширение спектра прямым кодом	Эффективно борется с помехами без изменения частоты; поддерживает одновременную работу нескольких платформ без конфликтов	Потребляет больше полосы пропускания, что приводит к низкой эффективности в условиях ограниченной полосы; легко обнаруживается интеллектуальными помехами
Адаптивное формирование луча с нулевой направленностью антенн	Усиливает направленный сигнал и снижает пространственные помехи; гибок в динамических средах без изменения частоты	Высокая сложность оборудования (требует множества антенн); эффективность снижается при быстром движении источника помех или нескольких источниках
Когнитивное радио с обнаружением спектра	Оптимизирует динамическое использование спектра; снижает конфликты с другими системами без предварительной координации	Время обнаружения спектра может вызывать задержки; неэффективно против интеллектуальных скрытых помех
Распределение спектра на основе обучения с подкреплением	Самостоятельно адаптируется без предварительных данных; эффективно в неопределенных средах	Длительное время начального обучения; не оптимальный при внезапных изменениях среды
Адаптивная фильтрация и подавление помех	Обработка помех в реальном времени без изменения системы; низкая стоимость и легкая интеграция в существующее оборудование	Эффективность зависит от точности оценки помех; слаба против сильных широкополосных помех

Результаты проведенного анализа указывают на необходимость гибридного подхода, интегрирующего несколько методов защиты в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка интеллектуальных систем принятия решений, способных динамически выбирать оптимальную стратегию защиты на основе анализа текущей электромагнитной обстановки. Интеграция методов искусственного интеллекта с моделями теориии игр открывает новые возможности для повышения устойчивости логистических систем на базе интеллектуальных роботизированных платформ в условиях все более сложной и насыщенной электромагнитной среды.

Список используемых источников

1. Белоусов А. О., Носов А. В. Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 10–47. DOI: 10.24412/2410–9916-2025-1-010-047.

2. Drone Logistics and Transportation Market Size, Share and Trends 2026 to 2035. URL: https://www.precedenceresearch.com/drone-logistics-and-transportation-market (дата обращения 15.11.2025).

3. Watanabe K. et al., «Electromagnetic Interference with the Mobile Communication Devices in Unmanned Aerial Vehicles and Its Countermeasures» in IEEE Access, vol. 12. PP. 11642-11652, 2024, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3351216.

4. Li J., Alvestegui D. G. -G., F. Rodriguez-Morales, and C. Leuschen, «Testing and Assessment of Small Unmanned Aerial Vehicle Susceptibility to Environmental Radio Frequency Interference» in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 66, no. 3. PP. 728-748, June 2024, DOI: 10.1109/TEMC.2024.3382576.

5. Yajnanarayana V., Y. -P. Eric Wang, S. Gao, S. Muruganathan, and X. Lin Ericsson, «Interference Mitigation Methods for Unmanned Aerial Vehicles Served by Cellular Networks,» 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), Silicon Valley, CA, USA, 2018. PP. 118-122, DOI: 10.1109/5GWF.2018.8517087.

6. Lubkowski G., M. Lanzrath, L. C. Lavau and M. Suhrke, «Response of the UAV Sensor System to HPEM Attacks» 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC EUROPE, Rome, Italy, 2020. PP. 1-6, DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245834.

7. Šimon O., T. Götthans and M. Popela, «Commercial UAV Jamming Possibilities» 2022 32nd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Kosice, Slovakia, 2022. PP. 1-6, DOI: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA54537.2022.9764904.

8. Du F., J. Li, Y. Lin, Z. Wang, and Y. Qian, «Mean-Field Multi-Agent Reinforcement Learning for Adaptive Anti-Jamming Channel Selection in UAV Communications» 2022 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 2022. PP. 910-915, DOI: 10.1109/WCSP55476.2022.10039304.

9. Huang, Tao, Yarong Liu, Xin Liu, and Meng Wang. 2025. «A New Improved Multi-Sequence Frequency-Hopping Communication Anti-Jamming System» Electronics 14, N. 3: 523. URL: https://doi.org/10.3390/electronics1403052.3.

10. Chirov D. S., O. G. Chertova, E. M. Lobov, and M. V. Bazylev, «Construction of a Communication Channel with UAVs Based on Direct Sequence Spread Spectrum Signals» 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2024. PP. 1-4, DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496771

11. Lourenço, Miguel e António Grilo. «Anti-Jamming based on Null-Steering Antennas and Intelligent UAV Swarm Behavior.» arXiv preprint arXiv:2511.18086 (2025). DOI:10.48550/arXiv.2511.18086.

12. Gul N, Kim SM, Ali J, Kim J (2023) UAV-aided virtual cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks. PLoS ONE 18(9): e0291077. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077.

13. Hengsheng Chen, Yuanguo Lin, Mingjian Fu, Lina Yao, and Michael Sheng. 2025. A Survey on Reinforcement Learning Methods for UAV Systems. ACM Comput. Surv. 58, 4, Article 103 (March 2026), 37 pages. URL: https://doi.org/10.1145/3769426.

14. Ni, Dadong, Xiaoqing Liu, Junyi Du, Yuansheng Wu, Chengxu Zhou, Chenxi Wang, and Haitao Xiao. 2025. «Intelligent Anti-Jamming Decision-Making Technology Based on Knowledge Graph and DQN» Sensors 25, no. 24: 7658. URL: https://doi.org/10.3390/s25247658.

ANALYSIS OF METHODS FOR PROTECTING CONTROL AND COMMUNICATION CHANNELS OF ROBOTIZED PLATFORMS IN TRANSPORT LOGISTICS FROM THE IMPACT OF INDUSTRIAL INTERFERENCE

Uss V., Hoang V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In modern logistics systems, robotic platforms – autonomous mobile robots (AMRs), and unmanned aerial vehicles (UAVs) – are increasingly popular, but face serious problems associated with electromagnetic interference of various origins, which critically affect the reliability of communication channels and delivery safety. The paper presents a systematic analysis of interference sources in transport logistics and a comparative analysis of existing methods for protection against interference, including spread spectrum techniques, adaptive beamforming, cognitive radio, and methods based on artificial intelligence.

Key words: robotic platforms, autonomous mobile robots, unmanned aerial vehicles, electromagnetic interference, control, transport logistics

УДК 004.94: 681.3: 621.01
ГРНТИ 50.41.35: 55.01.01: 55.37.01

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИНТА АРХИМЕДА

В. А. Чебыкин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Данная модель описывает широкий класс механических деталей и конструкций зданий и сооружений. Используется для обучения студентов. На данной модели демонстрируются методы описания сложной трехмерной поверхности. Приведена программная реализация класса, задающего аффинные преобразования трехмерного пространства. Этот класс позволяет вращать, масштабировать, перемещать деталь. Описанная модель может быть применена в системах автоматизированного проектирования механических устройств, а также зданий и сооружений. Реализованные алгоритмы также могут быть использованы для создания цифровых двойников технических объектов. Представлено приложение на языке C#, демонстрирующее использование разработанных классов.

параметрические модели, 3D моделирование

Трехмерные модели технических объектов используются при автоматизированном проектировании [1], в производстве и эксплуатации сложных систем [2].

Многие детали механизмов и конструктивных элементов сооружений имеют форму винта Архимеда. Например, складской пандус может иметь такую форму. Ниже приводится программный код на языке *C#* с использованием классов *WPF*. В этой технологии поверхность описывается в виде сетки плоских треугольников [3].

Для реализации модели создан класс *Vint*, который в свою очередь наследуется от класса *Surface,* базового для всех типов поверхностей разработанного приложения.

```
public class Surface
{
 protected Model3DGroup _modelGroup = new();
 protected Brush _brush;
protected int _n = 40;
 protected Point3D _centr = new(0, 0, 0);
ModelVisual3D? _modelVisual;
```

```
 public Model3DGroup ModelGroup { get => _modelGroup; set => _modelGroup = value;
}
 public ModelVisual3D? ModelVisual { get => _modelVisual; set => _modelVisual =
value; }

 public static void Iznanka(MeshGeometry3D mesh)
 {
 if (mesh != null)
 {
 for (int k = 0; k < mesh.TriangleIndices.Count; k += 3)
 {
 (mesh.TriangleIndices[k + 1], mesh.TriangleIndices[k]) = (mesh.TriangleIn-
dices[k], mesh.TriangleIndices[k + 1]);
 }
 }
 }
 public Surface( Point3D centr, int n, Brush brush)
 {
 _n = n;
 _centr = centr;
 _brush = brush;
 }

 public void AddToViewport(Dictionary<int, Trackball> trballs, System.Windows.Con-
trols.Viewport3D viewport3D)
 {
 _modelVisual = new ();
 _modelVisual.Content = ModelGroup;
 viewport3D.Children.Add(_modelVisual);
 Trackball trb = new (viewport3D);
 _modelVisual.Transform = trb.Transform;
 trballs.Add(_modelVisual.GetHashCode(), trb);
 }
 }
```

Метод *static void Iznanka(MeshGeometry3D mesh)* используется, когда поверхность необходимо вывернуть наизнанку. Обратная сторона треугольников в сетке *mesh* становится лицевой после выполнения этого метода. Для этого метод изменяет последовательность индексов в коллекции *mesh.TriangleIndices для* каждого треугольника сетки.

Классы наследники класса *Surface* (в том числе *Vint*) заполняют группу моделей *_modelGroup*. Эта группа, которая задает вид конкретной детали, добавляется на трехмерную сцену методом *AddToViewport (Dictionary<int, Trackball> trballs, Viewport3D viewport3D).* При этом с каждой деталью на сцене связывается объект класса *Trackball*, который позволяет выбранную пользователем деталь вращать, перемещать, масштабировать независимо от других элементов трехмерной сцены.

Рассмотрим реализацию класса *Vint*. В конструктор класса передаются параметры, описывающие форму детали. Радиус цилиндрической поверх-

ности *r*. Внешний радиус *R*. Количество витков спиральной поверхности *spiralTurns*. Высота внутреннего цилиндра *h*. Толщина нарезки винта *depth.* Также передаются значения координат на сцене, точность отрисовки и кисть для закраски лицевой поверхности *centr, n, brush.*

```
public class Vint:Surface
 {
 double _r = 1;
 double _R = 2;
 double _totalRadians;
 double _h = 1;
 double _depth = 0.1;
 double _deltaFi;
 double _deltaY;
 MeshGeometry3D _mesh;
 MeshGeometry3D _meshSpiral;
 MeshGeometry3D _meshStart;
 MeshGeometry3D _meshEnd;

 public Vint(double r,double R, double spiralTurns, double h, int n, double depth,
 Point3D centr, Brush brush): base(centr, n, brush)
 {
 _depth = depth;
 _r = r;
 _R = R;
 _n = n;
 _h = h;
 _centr = centr;
 _totalRadians = 2.0 * Math.PI * spiralTurns;
 _n = n;
 _brush = brush;
 _deltaFi = _totalRadians / _n;
 _deltaY = _h / _n;
 _mesh = CreateMesh();
 _meshSpiral = CreateMeshSpiral();
 _meshStart = CreateMeshStart();
 _meshEnd = CreateMeshEnd();
 CreateModel();
 }
```

Метод *CreateMesh()* создает сетку треугольников на поверхности винта. Создание такой сетки можно представить, как движение отрезка по спирали, которая закручивается вокруг оси *Y*. Концы отрезка при этом находятся на двух цилиндрических поверхностях радиусов *r* и *R*.

```
MeshGeometry3D CreateMesh()
 {
 MeshGeometry3D mesh = new ();

 double x0 = _r + _centr.X;
 double y0 = 0 + _centr.Y;
 double z0 = 0 + _centr.Z;
 double x1 = _R + _centr.X;
```

```
double y1 = 0 + _centr.Y;
double z1 = 0 + _centr.Z;
double x2, x3, y2, y3, z2, z3;

mesh.Positions.Add(new Point3D(x0, y0, z0));
mesh.Positions.Add(new Point3D(x1, y1, z1));
mesh.Normals.Add(new Vector3D(_r, 0, 0));
mesh.Normals.Add(new Vector3D(_R, 0, 0));
double fi = 0.0;
int i2;
for (int i = 0; i < _n; i++)
{
i2 = i * 2;
fi += _deltaFi;
x2 = _R * Math.Cos(fi) + _centr.X;
z2 = -_R * Math.Sin(fi) + _centr.Z;
y2 = y1 + _deltaY;
x3 = _r * Math.Cos(fi) + _centr.X;
z3 = -_r * Math.Sin(fi) + _centr.Z;
y3 = y0 + _deltaY;
mesh.Positions.Add(new Point3D(x2, y2, z2));
mesh.Positions.Add(new Point3D(x3, y3, z3));
mesh.Normals.Add(new Point3D(x2, y2, z2) – _centr);
mesh.Normals.Add(new Point3D(x3, y3, z3) – _centr);
if (i == 0)
{
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 0);
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 2);
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 1);
}else
{
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 0);
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 2);
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 3);

}
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 0);
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 3);
mesh.TriangleIndices.Add(i2 + 1);
y0 = y3;
y1 = y2;
}
return mesh;
}
```

Ниже приведен метод, который создает трехмерную модель винта Архимеда.

```
void CreateModel()
 {
 GeometryModel3D model = new (_mesh, new DiffuseMaterial(_brush));
 MeshGeometry3D meshClone = _mesh.Clone();
 Iznanka(meshClone);
 GeometryModel3D model2 = new (meshClone, new DiffuseMaterial(_brush));;
 model2.BackMaterial = model.Material;
 model2.Transform = new TranslateTransform3D(0, _depth, 0);
 GeometryModel3D modelSpiral = new (_meshSpiral, new DiffuseMaterial(_brush));
```

```
GeometryModel3D modelStart = new(_meshStart, new DiffuseMaterial(_brush));
GeometryModel3D modelEnd = new(_meshEnd, new DiffuseMaterial(_brush));
_modelGroup.Children.Add(model);
_modelGroup.Children.Add(model2);
_modelGroup.Children.Add(modelSpiral);
_modelGroup.Children.Add(modelStart);
_modelGroup.Children.Add(modelEnd);
MeshGeometry3D meshCyl = GenerateCyl(_centr, _r, _h+_depth, 20);
GeometryModel3D modelCyl = new (meshCyl, new DiffuseMaterial(_brush));
_modelGroup.Children.Add(modelCyl);
}
```

В нем клонируется поверхность винта, клон смещается на толщину резьбы и выворачивается на изнанку. Остальные поверхности закрывают спиральный зазор между этими двумя. И создается поверхность внутреннего цилидра.

На рис. 1 представлены три объекта класса *Vint*:

```
Vint v = new(1, 5, 3, 12, 200, 0.5, new Point3D(0, 0, 0), Brushes.Aqua);
Vint v2 = new(1, 4, 10, 10, 200, 0.1, new Point3D(12, 0, 0), Brushes.Coral);
Vint v3 = new(2.5, 3.0, 1, 2.5, 300, 0.8, new Point3D(-5, 10, 0), Brushes.Coral);
```

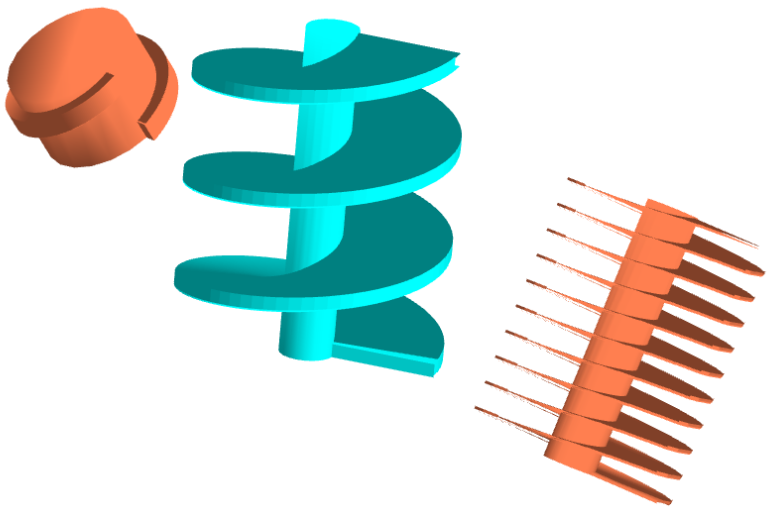


Рис. 1. Модели винтовых поверхностей.

Список используемых источников

1. Корнеев А. А., Капачев И. В. Методы и технологии автоматизированного проектирования. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 368 с.

2. Левицкий Ю. П., Петров И. Б. Модели и методы расчета и оптимизации механических конструкций. М.: Инфра-М, 2021. 256 с

3. Жермен-Лакур П., Жорж П. Л., Пистр Ф., Безье П. Математика и САПР: В 2 кн. Кн.2 Пер. с франц. Москва: Издательство Мир, 1989. 264 с. ISBN 5-03-000465-3.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE THREE-DIMENSIONAL PARAMETRIC MODEL OF THE ARCHIMEDES SCREW

Chebykin V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This model describes a wide class of mechanical parts and structures of buildings and structures. It is used for teaching students. This model demonstrates methods for describing a complex three-dimensional surface. A software implementation of a class defining affine transformations of a three-dimensional space is given. This class allows you to rotate, scale, and move a part. The described model can be applied in computer-aided design systems of mechanical devices, as well as buildings and structures. The implemented algorithms can also be used to create digital counterparts of technical objects. An application in the C# language is presented, demonstrating the use of the developed classes.

Key words: parametric models, 3D modeling

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 004.9
ГРНТИ 20.01.07

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

О. П. Бердыева

Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана

В статье рассматривается роль информационных технологий в современной жизни и взаимодействии в социальной, образовательной и профессиональной средах. Особое внимание уделяется интеграции цифровых инструментов в повседневную деятельность и трансформации коммуникационных процессов. В исследовании освещается влияние информационных технологий на эффективность обучения, профессиональное развитие и глобальное взаимодействие. Показано, что информационные технологии стали неотъемлемой частью современного общества. Результаты исследования могут быть полезны для исследователей и педагогов.

информационные технологии, цифровизация, современное общество, образование, коммуникация

Введение

На текущем этапе глобального развития информационные технологии (ИТ) выступают фундаментом жизнедеятельности социума. Интенсивная эволюция сетевой архитектуры и вычислительных мощностей привела к глубокой интеграции ИТ в экономические, образовательные и коммуникационные процессы. В актуальных отраслевых исследованиях подчеркивается, что динамика мирового информационного пространства диктует необходимость непрерывной модернизации протоколов обработки и защиты данных [1].

Повсеместная мобилизация и расширение зон покрытия высокоскоростного интернета обеспечили пользователям мгновенный доступ к мировым интеллектуальным ресурсам. В таких условиях жизнеспособность и конкурентоспособность любой структуры коррелируют с качеством внед-

ряемых цифровых решений. Сегодняшняя цифровая трансформация предопределяет не только технологический уклад, но и долгосрочные векторы развития общественных институтов [2].

Теоретические основы и сетевые параметры

Приоритетным направлением развития отрасли становится не столько количественное наращивание парка оборудования, сколько качественная оптимизация механизмов передачи данных. Базис этих процессов заложен в классической математической теории связи, устанавливающей теоретические пределы пропускной способности каналов передачи информации [3].

Практика показывает, что механическое усиление сигнала не гарантирует линейного улучшения качества сервиса. Ключевое значение приобретает учет плотности трафика и объема активных пользовательских сессий в конкретный момент времени. Исследование сетевых параметров подтверждает: для поддержания стабильности ИТ-сервисов необходима комплексная стратегия управления ресурсами. Данный аспект критически важен при проектировании современных инфраструктурных объектов, к которым предъявляются повышенные требования по отказоустойчивости.

Анализ эффективности передачи данных

В рамках данной работы было проведено изучение зависимости сетевых характеристик от операционной нагрузки. Результаты сравнительных испытаний сведены в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные параметры эффективности передачи данных

Отношение сигнал/шум	Количество абонентов	Пропускная способность (Мбит/с)	Время задержки (мс)
10	5	15.2	12.4
20	10	25.8	18.1
30	15	42.1	22.5

Интерпретация полученных показателей (таблица 1) демонстрирует прямую зависимость: улучшение отношения сигнал/шум положительно сказывается на пропускной способности. Тем не менее, рост числа подключенных абонентов провоцирует закономерную деградацию временных характеристик – задержка сигнала увеличивается с 12.4 до 22.5 мс. Получен-

ные результаты аргументируют целесообразность использования адаптивных алгоритмов распределения трафика для сохранения эксплуатационной стабильности соединений.

Заключение

Информационные технологии остаются главным драйвером трансформации глобальной среды, что актуализирует поиск новых методов работы с данными. Вектор дальнейших изысканий должен быть сосредоточен на достижении компромисса между расширением полосы пропускания и поддержанием высокого качества обслуживания (QoS) в условиях постоянного роста абонентской базы.

Список используемых источников

1. Информационные технологии в современном мире: Сборник научных трудов. М.: Техно сфера, 2023.
2. Прохоров А. П. Цифровизация и общество. Ашхабад: Наука, 2024.
3. Шеннон К. Математическая теория связи. М.: ИЛ, 1963.

Статья представлена кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Информационные системы» Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана Сейитнепесовым Ч.

INFORMATION TECHNOLOGY IN MODERN LIFE

Berdiyeva O.
Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan

The article examines the role of information technology in modern life ainteractionuence on social, educational, and professional environments. Particular attention is paid to the integration of digital tools into everyday activities and the transformation of communication processes. The study highlights the impact of information technologies on learning efficiency, professional development, and global interaction. It is shown that information technology has become an essential component of modern society. The results of the study may be useful for researchers and educators.

Key words: information technology, digitalization, modern society, education, communication

УДК 004.05
ГРНТИ 49.33.29

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ВИДЕОПОТОКА ПРИ УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ СИСТЕМАМИ ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

А. А. Березкин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

FPV-управление беспилотными системами предполагает передачу видеопотока от беспилотной системы к оператору. На основе видеопотока оператор формирует команды управления беспилотной системой. Очевидно, что ухудшение качества видеопотока приводит к ухудшению качества команд управления. Если команды управления не соответствуют ситуации в достаточной степени, то цель управления беспилотной системой не может быть достигнута. Из этого вытекает проблема обоснования требований к качеству видеопотока, при выполнении которых FPV-управление возможно. В этой статье предлагается методика, которая позволяет оценить и обосновать такие требования.

гибридная сеть, беспилотная система, FPV-управление, видеопоток, качество восстановленного видеопотока, метод ядерной оценки плотности, требования

Введение

FPV-управление – это управление беспилотной системой от первого лица. Данная разновидность управления предполагает:

– съемку текущей ситуации управления камерой, установленной на беспилотной системе;
– передачу снятого видеопотока оператору в режиме реального времени;
– просмотр видеопотока оператором и формирование понимания ситуации управления;
– составление оператором команд управления беспилотной системой на основе понимания ситуации управления;
– передача команд управления на беспилотную систему в режиме реального времени;
– применение команд управления беспилотной системой.

Качество команд управления определяется степенью соответствия достижения цели управления в текущей ситуации управления. Это качество зависит от соответствия ситуации управления и ее понимания оператором.

Понимание оператором текущей ситуации управления формируется на основе видеопотока. Соответственно, качество команд управления зависит от качества видеопотока.

При достаточно низком качестве команд управления достижение цели управления становится невозможным. Так, например, нельзя достичь требуемой позиции, если беспилотная система перемещается в обратном от нее направлении. Более того, возникает риск потери беспилотной системы. Так как команды управления зависят от качества видеопотока, то достаточно низкое качество команд управления достигается при достаточно низком качестве видеопотока.

Таким образом, возникает проблема нахождения и обоснования требований к качеству видеопотока FPV-управления беспилотными системами. В данной работе предлагается методика для решения этой проблемы.

Методика

Методика обоснования требований к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами основывается на работе [1] (рис. 1).

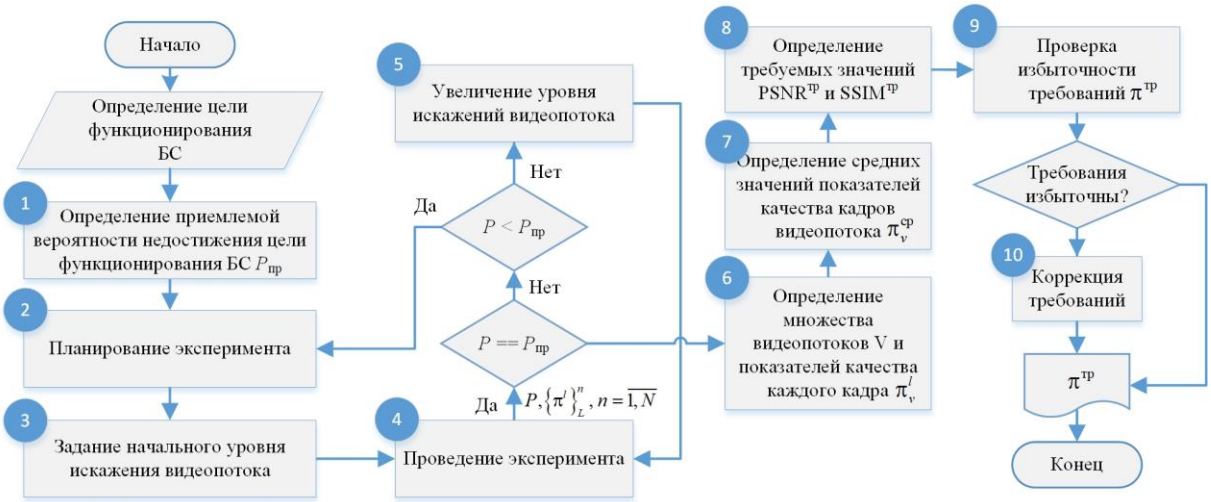


Рис. 1. Общая схема методики

Методика состоит из 10 этапов.

1. Этап определения приемлемой вероятности недостижения цели управления беспилотной системой. Для этого можно применять подход вероятностной оценки показателей риска [2, 3]. Пусть есть множество нежелательных факторов A_i, где i – сценарий недостижения цели управления. Вероятность реализация i-сценария недостижения цели P_i вычисляется по формуле [1]:

$$P_i = P(A_i^1)P\left(A_i^2|A_i^1\right)\dots P\left(A_i^{|A_i|}|A_i^1\dots A_i^{|A_i|-1}\right),$$

где A_i^k – k-элемент множества A_i.

Тогда вероятность недостижения цели $P_{\text{пр}}$ определяется как сумма вероятностей реализации сценариев [1]:

$$P_{\text{пр}} = \sum P_i.$$

2. Этап планирования эксперимента. В рамках эксперимента воссоздаются условия функционирования беспилотной системы. Так, например, для беспилотных наземных транспортных систем предлагается создать трассу для проездов. Трасса должна включать статические и динамические препятствия. В качестве трассы может использоваться коридор, а в качестве статических и динамических препятствий – блоки питания и роботы-пылесосы соответственно. Освещение трассы должно быть равномерным. Камера, установленная на беспилотной системе, должна обеспечивать запись видеопотока разрешения не менее HD и интенсивностью не менее 25 FPS. Должна обеспечиваться запись как исходного, так и восстановленного видеопотоков.

3. Этап задания начального уровня искажения видеопотока. Искажение видеопотока моделирует: искажение при кодировании и декодировании видеопотока; воздействие нежелательных факторов при прохождении видеопотока по каналу информационного обмена от беспилотной системы к оператору. Если используемый для кодирования видеопотока кодек динамически адаптируется к полосе пропускания, достаточно обеспечить изменение полосы пропускания и потерь в различных испытаниях, например, с использованием эмулятора сети NetDisturb [4].

Если видеокодек не обеспечивает адаптацию к изменяющейся полосе пропускания и восстановленный им видеопоток не чувствителен к потерям, то необходимо переключать конфигурации видеокодека. Такими являются некоторые разновидности нейросетевых видеокодеков: классический NVC (neural video codec) [5, 6], NVC с подавлением артефактов [7], NVC с маскированием [8, 9]. В качестве альтернативы подобные видеокодеки могут применяться в составе адаптивных систем задержки и интенсивности видеопотока, которые обеспечивают переключение конфигураций в зависимости от состояния сети [10, 11].

4. Этап проведения эксперимента. На данном этапе проводится эксперимент согласно его методике (см. этап 2) с заданным уровнем искажения

видеопотока (см. этап 3). В результате экспериментом определяется вероятность достижения цели управления P и соответствующее данной вероятности множество значений показателей качества видеопотока $П = \{\pi\}$. К показателям качества π могут относиться, в частности, SSIM [12] (structural similarity – структурное сходство) и PSNR [13] (peak sound-to-noise ratio – пиковое отношение сигнала к шуму).

Если $P = P_{пр}$, то переход на этап 6. Если $P < P_{пр}$, то коррекция искажения и переход на этап 2. Иначе переход на этап 5.

5. На пятом этапе выполняется увеличение степени искажения видеопотока. После пятого этапа выполняется переход на этап 4.

6. Определение множества видеопотоков, которые позволили достичь цели управления беспилотной системой. На данном этапе видеопотоки, относящиеся к неудачным сеансам управления, отбрасываются.

7. Определение математических ожиданий показателей качества видеопотока из множества $П = \{\pi\}$ для успешных сеансов управления. Пусть методом Розенблатта-Парзена [14] (ядерной оценкой плотности) выполнена ядерная оценка плотности вероятности j-показателя $f(\pi_j)$. Тогда математическое ожидание находится как [1]:

$$\bar{\pi}_j = \int_{-\infty}^{\infty} \pi_j f\left(\pi_j\right) d\pi.$$

9. Определение требуемых значений. В качестве требований принимаются среднее значение полученных математических ожиданий показателя для успешных сеансов управления:

$$\pi_j^{тр} = \frac{\sum \bar{\pi}_j}{|П|}.$$

9. Проверка избыточности требований. Если вероятность достижения требований по всем показателям качества видеопотока достаточно близка к единице, требования считаются избыточными. Если нет, то переход на этап 10.

10. Коррекция требований. Если требования по всем показателям качества видеопотока не близки к единице, то за требования принимаются изначально заданные требование. Это приводит к повышению требуемых значений всех или части показателей качества видеопотока из множества $П = \{\pi\}$.

Заключение

Данная статья посвящена проблеме оценки и обоснования требований к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами от пер-

вого лица. Необходимость оценки требований возникает по причине того, что при уменьшении качества видеопотока качество команд управления уменьшается. Это в конечном счете приводит к невозможности достижения цели управления беспилотной системой.

В статье предлагается обоснования данных требований, состоящая из восьми этапов. Характерные особенности методики: вероятностный подход к оценке рисков; выбор показателей качества видеопотока; натурные эксперименты; ядерная оценка плотности вероятности.

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1025040100166-2-2.2.4;2.2.5;2.2.6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Список используемых источников

1. Березкин А. А., Вивчарь Р. М., Киричек Р. В. Подход к обоснованию требований к качеству видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 7–15.

2. ГОСТ Р ИСО 11231-2013 Менеджмент риска. Вероятностная оценка риска на примере космических систем. Москва: СтандартИнформ, 2014.

3. NASA/SP-2011-3421. Probabilistic risk assessment rrocedures guide for NASA managers and practitioners. NASA, 2011.

4. NetDisturb // ZTI Communications. URL: https://www.zti-communications.com/netdisturb (дата обращения: 11.02.2026).

5. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. 2024. № 9. С. 28–37.

6. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. 2024. № 10. С. 59–69.

7. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. Нивелирование артефактов кадров видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22. № 1 (85). С. 7–17.

8. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть I. Модели и методика // Электросвязь. 2024. № 12-2. С. 52–65.

9. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть II. Обучение моделей и эксперименты // Электросвязь. 2025. № 5. С. 34–41.

10. Березкин А. А., Паршин А. А., Лазарев А. А. Адаптивный контроль интенсивности видеопотока при передаче FPV-трафика беспилотных систем // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1(79). С. 158–161.

11. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. Исследование границ интенсивности видеопотока при FPV-управлении БПЛА в режиме предсказания кадров. Часть II:

адаптивный контроль интенсивности видеопотока // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19. № 3. С. 139–164.

12. Nilsson J., Akenine-Möller T. Understanding SSIM // arXiv preprint arXiv:2006.13846. 2020

13. Huynh-Thu Q., Ghanbari M. The accuracy of PSNR in predicting video quality for different video scenes and frame rates // Telecommunication systems. 2012. Т. 49. № 1. С. 35–48.

14. Gramacki A. Kernel density estimation // Nonparametric Kernel Density Estimation and Its Computational Aspects. Cham: Springer International Publishing, 2017. С. 25–62.

FPV-CONTROL VIDEO STREAM QUALITY REQUIREMENTS ESTIMATION METHOD

Berezkin A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Unmanned systems FPV control entails the video stream transmission from the unmanned system to the operator. Based on the video stream, the operator generates commands to control the unmanned system. Obviously, degraded video stream quality leads to degraded control command quality. If the control commands do not adequately correspond to the situation, the unmanned system operation goal cannot be achieved. This raises the issue of the video stream quality requirements estimation. If the quality requirements are met, FPV control should be possible. This article proposes a method to estimate such requirements.

Key words: hybrid network, unmanned system, FPV-control, first person view control, reconstructured video stream quality, kernel density estimation method, requirements

УДК 004.627:004.032.26
ГРНТИ 49.33.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ КОДЕКА DCVC-RT ДЛЯ СЖАТИЯ ВИДЕОПОТОКА НА РАЗЛИЧНЫХ GPU

А. А. Березкин, А. А. Ченский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Для передачи кадров видеопотока в реальном времени с высокой степенью сжатия и как следствие низкой полосой пропускания могут применяться нейросетевые видеокодеки. Особенностью нейросетевых видеокодеков является применение для сжатия кадров видеопотока технологий нейронных сетей. Для быстрого выполнения нейронных сетей их выполняют на графических процессорах. Тем не менее, результаты операций числами с плавающей запятой на различных графических процессорах могут отличаться. Это может привести к значительному ухудшению качества восстановления кадров видеопотока в нейросетевых кодеках. В настоящей работе исследуется применимость нейросетевого видеокодека DCVC-RT на различных графических процессорах.

нейронная сеть, видео, видеопоток, кадр видеопотока, DCVC-RT, видеокодек, нейросетевой видеокодек, графический процессор, GPU, применимость, число с плавающей запятой, синхронизация видеоданных.

Введение

В настоящее время передача видеопотока широко применяется. К областям применения данной сетевой услуги относятся: видеоконференции [1, 2]; трансляция фильмов [3]; управление беспилотными воздушными судами от первого лица [4-8]; видеонаблюдение [9]; синхронизация видеоданных [10]; спасении людей в чрезвычайных ситуациях [11].

Сетевая услуга передачи видеопотока в реальном времени характеризуется в том числе: задержкой, требуемой полосой пропускания и качеством восстанавливаемых кадров видеопотока. Передача видеопотока требует большую полосу пропускания. Следовательно, для эффективной передачи видеопотока по сетям связи используется его сжатие. Сжатие видеопотока проводится видеокодеками, такими как H264, H265, AV1 [12]. При ограниченной пропускной способности сетей связи (в десятки и сотни Кбит/с) используются нейросетевые видеокодеки, которые имеют меньшую полосу пропускания по сравнению со стандартными видеокодеками [13].

Использование нейросетевых видеокодеков приводит к увеличению задержки за счет высокого времени выполнения нейронных сетей. Для уменьшения времени выполнения нейронных сетей используют графические процессоры (GPU – Graphical Processing Unit). В ходе выполнения нейронных сетей используются операции с числами с плавающей запятой. При этом на различных устройствах GPU данные операции могут давать различные результаты [14].

Нейросетевой видеокодек состоит из кодера, размещенном на стороне отправления, и декодера, размещенном на стороне получения. Пусть на кодере и декодере установлены различные GPU. Тогда при кодировании и последующем декодировании кадра видеопотока возможно дополнительное искажение кадра видеопотока, не связанное со структурой и весами нейронной сети. В зависимости от того, насколько значительно данное искажение, нейросетевой видеокодек может стать неприменимым для обеспечения услуги передачи видеопотока в реальном времени.

В настоящей статье исследуется применимость нейросетевого видеокодека DCVC-RT [15] для оказания услуги передачи видеопотока в реальном времени при использовании различных GPU на стороне нейросетевых кодера и декодера.

Методика

Пусть на ПК-А кодер DCVC-RT размещен на GPU-A, а на ПК-Б декодер размещен на GPU-Б (рис. 1). Тогда в рамках экспериментов 100 кадров видеопотока, которые поступают из видео полета беспилотного воздушного судна, управляемого от первого лица, (рис. 2 [16]), кодируется на ПК-А и декодируются на ПК-Б. Данное видео характеризуется высокой динамикой и широким диапазоном цветов.



Рис. 1. Экспериментальная установка



Рис. 2. Примеры кадров видеопотока

После кодирования и декодирования каждого кадра видеопотока между исходным и восстановленным кадрами видеопотока измеряются метрики: MSize (minimum size – минимальный размер), SSIM (structure similarity – структурное сходство), PSNR (peak sound to noise ratio – пиковое отношение сигнала к шуму) [7, 8], LPIPS (learned perceptual image patch similarity – обученное сходство восприятия частей изображений) по VGG-16 и AlexNet [17].

Метрика MSize – это размер сжатой бинарной последовательности, полученной после кодирования кадра видеопотока, в байтах. Метрика SSIM отражает структурное качество восстановленных кадров видеопотока и вычисляется по формуле [16]:

$$\mathrm{SSIM}(x, \hat{x}) = \frac{(2\mu_x\mu_{\hat{x}}+C_1)(2\sigma_x\sigma_{\hat{x}}+C_2)}{(\mu_x^2+\mu_{\hat{x}}^2+C_1)(\sigma_x^2+\sigma_{\hat{x}}^2+C_2)},$$

где x – исходный кадр видеопотока, $\hat{x}$ – восстановленный кадр видеопотока, μ – среднее значение пикселей кадра видеопотока, σ – среднеквадратическое отклонение значений пикселей кадра видеопотока, $C_1 \ll 1$ и $C_2 \ll 1$ – коэффициенты, которые вводятся во избежание деления на ноль и имеют близкое к нулю положительное значение.

Метрика PSNR отражает соответствие значений цветов пикселей кадров видеопотока и вычисляется по формуле [16]:

$$\mathrm{PSNR} = 20\,lg\left(\frac{peakval}{\sqrt{\mathrm{MSE}}}\right) = 20\,lg\left(\frac{255}{\sqrt{\mathrm{MSE}}}\right) \text{(дБ)},$$

где *peakval* является максимальным значением данных о пикселях изображения, измеряется в децибелах (дБ) (для кадров видеопотока 255). Значение MSE вычисляется в соответствии с выражением [16]:

$$\text{MSE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{n=1}^{M} \sum_{m=1}^{N} (\hat{g}(n,m) - g(n,m))^2$$

где $\hat{g}(n,m)$ – значение n-го по высоте и m-го по ширине пикселя восстановленного кадра видеопотока, а $g(n,m)$ – значение n-го по высоте и m-го по ширине пикселя исходного кадра видеопотока, N и M – высота и ширина кадров видеопотока соответственно.

Было проведено 4 эксперимента:

1. ПК-А – GPU Nvidia RTX 5070 Ti; ПК-Б – Nvidia RTX 5070 Ti.
2. ПК-А – GPU Nvidia RTX 5070 Ti; ПК-Б – GPU Nvidia A100.
3. ПК-А – GPU Nvidia A100; ПК-Б – GPU Nvidia RTX 5070 Ti.
4. ПК-А – GPU Nvidia A100; ПК-Б – GPU Nvidia A100.

Эксперимент

Эксперименты показывают (табл. 1), что при кодировании и декодировании видеопотока на одной видеокарте изменения в качестве восстанавливаемых кадров незначительны и не превышают сотых тысячных долей процентов, а при кодировании и декодировании на различных видеокартах – значительные (рис. 3). Кроме того, кодирование на менее мощной GPU Nvidia RTX 5070 Ti и декодирование на более мощной Nvidia RTX A100 показало себя лучше, чем кодирование на более мощной GPU и декодирование на менее мощной. Средний размер сжатой бинарной последовательности *MSize* изменяется незначительно в зависимости от видеокарты, на которой проводится кодирование.

ТАБЛИЦА 1. Результаты экспериментов

Эксперимент	MSize, байт	SSIM, дБ	PSNR, дБ	LPIPSVGG	LPIPSAlexNet
1	3184,0830	0,7607	31,7914	0,4260	0,3330
2	3184,0830	0,5803	29,5652	0,5356	0,4837
3	3184,2620	0,5617	29,5081	0,5445	0,4982
4	3184,2620	0,7607	31,7909	0,4260	0,3330



Рис. 3. Сравнение кадров видеопотока

Заключение

При использовании видеокодека DCVC-RT степень сжатия кадров видеопотока зависит от GPU кодирования и изменяется незначительно. Качество кадров видеопотока незначительно изменяется при использовании одинаковых GPU на этапе кодирования и декодирования, и значительно ухудшается при различных. Симметрия метрик отсутствует. Так, если вместо GPU кодирования использовать GPU декодирования, качество изменяется, в частности, по причине появления новых артефактов.

Таким образом, гипотеза исследования подтверждена. Видеокодек DCVC-RT сильно чувствителен от оборудования кодирования и декодирования, что значительно ограничивает его применение в реальных системах передачи видеопотока в реальном времени.

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1025040100166-2-2.2.4;2.2.5;2.2.6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Список используемых источников

1. Vishruth R. V. V., Mohan S. G. Online video conference analytics: A systematic review // Applied Data Science and Smart Systems. 2024. С. 435–447.

2. 斎賀 和彦. 動画コンテンツ制作入門 // 情報の科学と技術. 2022. Т. 72. № 2. С. 44–48.

3. 辻 泰明. 動画の特性と社会 // 情報の科学と技術. 2022. Т. 72. № 2. С. 38–43.

4. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // Электросвязь. 2024. № 6. С. 26–36.

5. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I // Электросвязь. 2024. № 6. С. 10–16.

6. Березкин А. А., Ченский А. А., Вивчарь Р. М., Киричек Р. В. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть II // Электросвязь. 2024. № 7. С. 26–35.

7. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. 2024. № 9. С. 28–37.

8. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. 2024. № 10. С. 59–69.

9. Elharrouss O., Almaadeed N., Al-Maadeed S. A review of video surveillance systems // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2021. Т. 77. С. 103–116.

10. Jiang Z., Da H., Qiu Y., Pan J. Overview of Data Synchronization and Fault Recovery Technology in Multi Active Data Center // 2021 IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). IEEE, 2021. С. 113–118.

11. Dinh T. D. et al. Unmanned aerial system–assisted wilderness search and rescue mission //International Journal of Distributed Sensor Networks. 2019. Т. 15. № 6.

12. Boumehrez F., Sahour A., Djellab H., Maamri F. The efficiency of HEVC/H.265, AV1, and VVC/H.266 in terms of performance compression and video content // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI). 2024. Т. 12. № 3. С. 583–593.

13. Березкин А. А., Ченский А. А. Методика тестирования конфигураций нейросетевых видеокодеков // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2025. Т. 1. С. 161–164.

14. Whitehead N., Fit-Florea A. Precision & performance: Floating point and IEEE 754 compliance for NVIDIA GPUs // rn (A+ B). 2011. Т. 21. № 1. С. 18749–19424.

15. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., Lu Y. Towards practical real-time neural video compression // Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference. 2025. С. 12543–12552.

16. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. Сокращение задержки FPV-управления БВС через спутниковые каналы связи методом предсказания // Электросвязь. 2025. № 4. С. 13–24.

17. Hernández-Cámara P., Vila-Tomás J., Laparra V., Malo J. Analysis of deep image quality models // arXiv preprint arXiv:2302.13345. 2023.

RESEARCH OF DCVC-RT APPLICABILITY FOR VIDEO STREAM COMPRESSION ON DIFFERENT GPU

Berezkin A., Chenskiy A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In order to transmit video stream frames in real time with a high compression ratio and, consequently, with a low bandwidth, neural video codecs can be used. The characteristic feature of the neural video codecs is the application of neural network technologies for video stream frames. Neural video codecs are often executed in graphical processing units to ensure fast execution. Nevertheless, the results of the floating-point number operation in graphical processing units may differ depending on the specific device. It can entail the deterioration of the video stream frame decoding quality. In the present work, the DCVC-RT neural video codec applicability in different graphical processing unit devices is researched.

Key words: neural network, video, video stream, video stream frame, DCVC-RT, video codec, neural video codec, graphical processing unit, GPU, applicability, floating-point number, float, video data synchronization

УДК 004.05:[004.627:004.932]
ГРНТИ 49.40

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТРИКИ LPIPS ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОДИРОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫМИ ВИДЕОКОДЕКАМИ

А. А. Березкин, А. А. Ченский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

FPV-управление беспилотными воздушными судами требует передачи видеопотока на станцию внешнего пилота. При передаче видеопотока его кадры кодируются с применением как стандартных, так и нейросетевых видеокодеков. Для оценки качества методов кодирования видеопотока применяются метрики качества изображения, такие как PSNR и SSIM. Тем не менее, данные метрики ориентированы на оценку качества кодирования кадров видеопотока стандартными видеокодеками. Их применение к кадрам, восстановленным нейросетевыми кодеками, приводит к несоответствию существующим шкалам качества изображений, в которых указаны соответствующие значения метрик, MOS и эмпирической характеристики качества. В настоящей работе оценивается возможность применения метрики LPIPS для оценки качества нейросетевых кодеков и корректировки существующих шкал соответствия объективных метрик и субъективных оценок качества изображений.

БВС, беспилотные воздушные системы, БАС, беспилотные авиационные системы, БПЛА, беспилотные летательные аппараты, видеокодек, нейросетевой видеокодек, стандартный видеокодек, сжатие видеопотока, видеопоток, FPV-управление, управление от первого лица, оценка качества, качество видеопотока.

Введение

При управлении беспилотными воздушными судами (БВС) от первого лица (FPV – first person control) требуется передача: телеметрической информации и полезной нагрузки (видеопотока и прочих данных с сенсоров) на станцию внешнего пилота (СВП) и команд управления на БВС [1]. Для передачи видеопотока требуется значительная полоса пропускания, по причине чего применяются методы кодирования (сжатия) видеопотока стандартными и нейросетевыми видеокодеками. К стандартным видеокодекам относятся: H264, H265, H266, VP8, VP9, AV1 [2]. К нейросетевым видеокодекам относятся DCVC-RT [3], NVC (neural video codec – нейросетевой видеокодек [4, 5] и его предшественники [6-8]).

В связи с тем, что FPV-управление подразумевает реакцию оператора, то соответствие команд управления полетной обстановке определяется качеством методов кодирования видеопотока. Качество метода кодирования видеопотока определяется значением метрик качества восстановленных кадров видеопотока. Метрики качества восстановленных кадров видеопотока вычисляются между восстановленными кадрами видеопотока и соответствующими им исходными кадрами видеопотока. Характеристики методов кодирования видеопотока включают в себя необходимую полосу пропускания и качество восстановленных кадров. Каналы информационного обмена (КИО), по которым может проводиться FPV-управление БВС, имеют ограниченную полосу пропускания. При этом уменьшение полосы пропускания приводит к уменьшению качества видеопотока.

Для определения качества методов кодирования видеопотока могут применяться субъективные и объективные метрики. К субъективным метрикам относятся: *MOS* (Mean Opinion Score – средняя оценка мнений) [9], *DSIS* (Double Stimulus Impairment Scale – шкала несоответствий двух воздействий), *DSCQS* (Double Stimulus Continuous Quality Scale – непрерывная качественная шкала двух воздействий), *SCACJ* (Stimulus Comparison Adjective Comparison Judgement – адъективное сравнение стимулов), *SAMVIQ* (Subjective Assessment Methodology for Video Quality – субъективная методология оценки качества видео), *MSUCQE* (MSU Continuous Quality Evaluation – оценка непрерывного качества MSU) [10]. Субъективные метрики вычисляются при просмотре экспертами восстановленной (и в некоторых случаях исходной) видеопоследовательности и получением средней оценки качества по некоторой шкале. Объективные метрики, такие как *PSNR* (Peak signal-to-Noise Ratio – пиковое отношение сигнала к шуму) и *SSIM* (Structural Similarity – структурное сходство) [11], вычисляются между исходными и восстановленными кадрами видеопотока, после чего находятся их средние значения. При этом исключаются выбросы, которые вызваны, в частности, потерей опорных (ключевых) кадров при использовании стандартных кодеков, замираниями изображения из-за потерь большого количества кадров или проблемами в программной реализации механизмов отображения видеопотока.

В работах [10, 12] представлена таблица соответствия значений метрики *PSNR*, метрики *MOS* и субъективного качества видеопотока (табл. 1). В работе [9] предлагается метод оценки соответствия значений метрик *PSNR*, *MOS* и субъективного качества видеопотока и полученные в результаты применения метода другие оценки *PSNR* для одинаковых *MOS*.

ТАБЛИЦА 1. Соответствие PSNR и MOS

PSNR [10, 12], дБ	PSNR [9], дБ	MOS	Качество
> 37	> 36	5	Прекрасное
31-37	29-36	4	Хорошее
25-31	22-29	3	Удовлетворительное
20-25	20-22	2	Низкое
< 20	< 20	1	Плохое

Тем не менее, согласно [4, 5], для нейросетевых кодеков при значениях *PSNR* ниже 29 дБ качество видеопотока уже является плохим, а ниже 27-28 дБ – неприемлемым. Соответственно, существующие таблицы соответствий неприменимы для нейросетевых кодеков. Это указывает на малую применимость таблиц соответствия объективных метрик *PSNR и SSIM* (табл. 1) для оценки субъективного качества кодирования видеопотока нейросетевыми кодеками. Причиной являются специфичные для нейросетевых кодеков виды искажений:

– структурные искажения элементов кадров. Так прямая линия может превратиться в кривую линию, а прямые контуры зданий – в кривые;
– возникновение цветовых искажений кадров;
– артефакты вариационных автокодировщиков [13].

Субъективное качество при данных видах искажений изменится несущественно, но значения объективных метрик *PSNR* и *SSIM* значительно ухудшатся. Следовательно, необходима такая метрика, которая позволит единообразно оценивать качество кодирования видеопотока как стандартными, так и нейросетевыми кодеками. В настоящей работе оценивается применимость метрики *LPIPS* (Learned Perceptual Image Patch Similarity – обученная схожесть восприятия частей изображений) [14]. Заявляется, что она хорошо отражает качество восприятия изображений. Особенностью данной метрики является применение предобученных нейронных сетей на основе моделей AlexNet или VGG.

Методика измерений

С компьютера А на компьютер Б передается видеопоток, закодированный стандартными видеокодеками VP9, AV1, H264, H265, H266 и NVC (Neural Video Codec – нейросетевой видеокодек) [4, 5]. На компьютере А записываются исходные кадры видеопотока, а на компьютере Б восстанов-

ленные. Между ними вычисляются метрики качества: *PSNR*, *MSE*, *SSIM*, $LPIPS_{VGG}$ (*LPIPS* на основе модели VGG), $LPIPS_{AlexNet}$ (*LPIPS* на основе модели AlexNet).

Исходный набор данных для анализа того, обеспечивает ли применение *LPIPS* общую качественную шкалу для стандартных и нейросетевых кодеков, представляет собой множество измеренных метрик качества восстановленных кадров видеопотока (*SSIM*, *PSNR*, *MSE*, *LPIPS*).

Результаты

Корреляционный анализ значений метрик качества восстановленных кадров видеопотока показал (табл. 2, где ст. – для стандартных, нейр. – для нейросетевых), что наибольшая корреляция наблюдается между *SSIM* и $LPIPS_{VGG}$ как для стандартных, так и для нейросетевых видеокодеков. При этом общий коэффициент корреляции для стандартных и нейросетевых видеокодеков между *SSIM* и $LPIPS_{VGG}$ составляет 0,9524. В ходе экспериментов была найдена особенность, что для стандартных видеокодеков значение коэффициента корреляции между *SSIM* и *PSNR* мало и составляет 0,5539, в то время как для нейросетевых это значение равно 0,8496.

ТАБЛИЦА 2. Значения коэффициента корреляции Пирсона между метриками

Метрика	PSNR (ст.)	MSE (ст.)	SSIM (ст.)	PSNR (нейр.)	MSE (нейр.)	SSIM (нейр.)
LPIPSVGG	–0,3417	0,3425	–0,8435	–0,7942	0,8002	–0,8681
LPIPSAlexNet	–0,3350	0,3417	–0,7835	–0,7250	0,7359	–0,7993

Согласно [15], *LPIPS* обладает высокой корреляцией с *MOS* (0,749). Так как минимальному *LPIPS* = 0 соответствует *MOS* = 5, а максимальному *LPIPS* = 1 – *MOS* = 1, то можно приблизительно оценить *MOS* с помощью регрессии:

$$MOS \approx 5 - 4 \times LPIPS_{VGG}. \quad (1)$$

В свою очередь $LPIPS_{VGG}$ можно оценить моделью экспоненциальной регрессии из значения метрики *SSIM* (рис. 1):

$$LPIPS_{VGG} \approx 1 - exp(1{,}7072 \times SSIM - 1{,}8299), \quad (2)$$

В результате регрессионного анализа 1537 кадров видеопотока построена регрессионная модель для оценки *SSIM* для нейросетевых кодеков (рис.

2, где при левой части уравнения меньше нуля *SSIM* принимается равным 0, а больше единицы – 1):

$$SSIM \approx 1 - exp(-0{,}4651 \times PSNR + 12{,}8440). \quad (3)$$

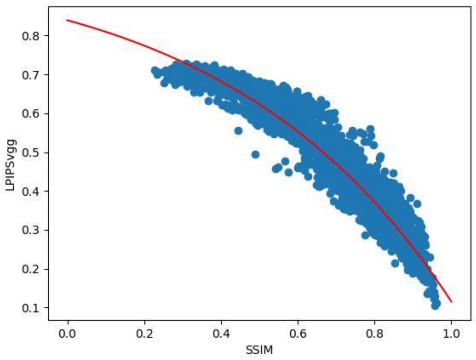


Рис. 1. Зависимость между *SSIM* и *LPIPS*

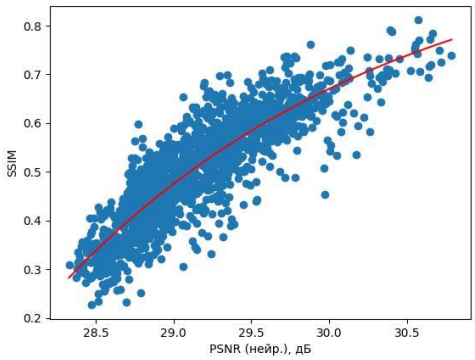


Рис. 2. Зависимость между *SSIM* и PSNR (нейр.)

Из (2) и (3) следует, что $LPIPS_{VGG}$ для нейросетевых видеокодеков приблизительно оценивается как:

$$LPIPS_{VGG} \approx 1 - exp(1{,}71 \times (1 - exp(-0{,}47 \times PSNR + 12{,}84)) - 1{,}83), \quad (4)$$

Выражения (1) и (4) позволяют выполнить приблизительный пересчет метрик качества кадров (*PSNR* на основе $LPIPS_{VGG}$) и как следствие скорректировать таблицу соответствия (табл. 3). За пороговое значение качества «Прекрасное» принимается значение исходной шкалы (табл. 1).

ТАБЛИЦА 3. Скорректированное соответствие метрик и субъективного качества

PSNR (ст.), дБ	PSNR (нейр.), дБ	LPIPSVGG	MOS	Качество
> 37	> 37	0,00	5	Прекрасное
31-37	32,64-37,00	0,25	4	Хорошее
25-31	29,97-32,64	0,50	3	Удовлетворительное
20-25	28,26-29,97	0,75	2	Низкое
< 20	< 28,26	1,00	1	Плохое

Заключение

В настоящей работе оценивается применимость *LPIPS* (на основе нейросетевых моделей VGG и AlexNet) для оценки качества нейросетевых видеокодеков. Проведены эксперименты по измерению метрик качества

восстановленных кадров видеопотока для стандартных видеокодеков (H264, H265, H266, VP9, AV1) и NVC.

Корреляционный анализ показал, что *SSIM* сильно коррелирует с $LPIPS_{VGG}$ как для стандартных, так и для нейросетевых кодеков. В то же время *PSNR* и *MSE* сильно коррелируют с *SSIM* исключительно для нейросетевых кодеков. Это позволило составить регрессионные модели для оценки *SSIM* и $LPIPS_{VGG}$ и уточнить шкалу соответствия объективных и субъективных метрик качества применительно к нейросетевым видеокодекам.

Таким образом, для оценки качества нейросетевых кодеков унифицированным со стандартными образом допускается применять метрику качества $LPIPS_{VGG}$.

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1025040100166-2-2.2.4;2.2.5;2.2.6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Список используемых источников

1. González N., Solera M., Ruiz F., Gijón C., Toril M. A quality of experience model for live video in first-person-view drone control in cellular networks // Computer Networks. 2023. Т. 237. С. 110089.

2. Esakki G. Adaptive encoding for constrained video delivery in HEVC, VP9, AV1 and VVC compression standards and adaptation to video content: дис. The University of New Mexico, 2020.

3. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., Lu Y. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression // arXiv preprint arXiv:2502.20762. 2025.

4. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. 2024. № 9. С. 42-51.

5. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. 2024. № 10. С. 59-69.

6. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // Электросвязь. 2024. № 6. С. 46-56.

7. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I // Электросвязь. 2024. № 6. С. 58-64.

8. Березкин А. А., Ченский А. А., Вивчарь Р. М., Киричек Р. В. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть II // Электросвязь. 2024. № 7. С. 26-35.

9. Moldovan A. N., Ghergulescu I., Muntean C. H. VQAMap: A novel mechanism for mapping objective video quality metrics to subjective MOS scale // IEEE Transactions on Broadcasting. 2016. Т. 62. № 3. С. 610-627.

10. Иванов Ю. А., Лукьянцев С. А. Методика оценки качества декодирования видео стандарта H. 264/AVC/SVC в беспроводных сетях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 4. С. 35-47.

11. Hore A., Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM // 2010 20th international conference on pattern recognition. IEEE, 2010. С. 2366-2369.

12. Klaue J., Rathke B., Wolisz A. EvalVid–a framework for video transmission and quality evaluation // Computer Performance Evaluation. Modelling Techniques and Tools: 13th International Conference, TOOLS 2003, Urbana, IL, USA, September 2-5, 2003. Proceedings 13. Springer Berlin Heidelberg, 2003. С. 255-272.

13. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. Нивелирование артефактов кадров видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22. № 1 (85). С. 7-17.

14. Zhang R., Isola P., Efros A. A., Shechtman E., Wang O. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018. С. 586-595.

15. Antsiferova A., Lavrushkin S., Smirnov M., Gushchin A., Vatolin D., Kulikov D. Video compression dataset and benchmark of learning-based video-quality metrics // arXiv:2211.12109.

RESEARCH OF LPIPS METRIC APPLICABILITY FOR NEURAL CODECS QUALITY ESTIMATION

Chenskiy A., Berezkin A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Unmanned aircraft FPV control involves video streaming transmission to the external pilot's station. When transmitting the video stream, its frames are encoded using either standard or neural video codecs. Image quality metrics such as PSNR and SSIM are used to evaluate the video stream coding methods. However, these metrics are targeted at standard video codecs frames encoding evaluation. By applying the metrics to frames reconstructed by neural network codecs, they result in inconsistency with existing image quality scales that specify the corresponding values of metrics, MOS and empirical quality characteristics. This paper assesses the LPIPS metric's applicability for neural codecs quality assessment and correction of existing scales of objective metrics and subjective assessments of image quality.

Key words: UAV, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft system, video codec, neural video codec, standard video codec, video stream compression, video stream, FPV-control, first person view control, quality estimation, video stream quality

УДК 004.7:004.422.8
ГРНТИ 20.01.07

ПРОГРАММИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА ПЕРЕКРЕСТКЕ СРЕДСТВАМИ ANYLOGIC

И. Б. Бондаренко, А. В. Параничев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается методика управления транспортными средствами в режиме многопоточности на модели перекрестка с использованием среды AnyLogic. Описываются проблемы при организации движения автотранспорта через сложный перекресток. Приведена модель для имитационного моделирования и ее компоненты. Рассмотрены варианты критериев качества системы управления. Режимы управления транспортными потоками могут осуществляться через интерфейс программы, или программным путем на языке Java. В работе использована модель Дарроха для апробации работы системы управления для выбранного перекрестка. Показаны достоинства и недостатки модели при управлении многопоточным трафиком. Результаты работы могут быть использованы в автоматической системе регулирования движения, а также в областях, связанных с управлением сложными динамическими системами.

система управления, дорожное движение, модель, анализ данных, транспортный поток, моделирование, модель Дарроха, AnyLogic

Управление транспортными потоками, проходящими через перекрестки, управляемые светофорами, является сложной задачей. Подтверждение тому – множество разработок в этой области как отечественных, так и зарубежных, часть из которых функционирует в определенной локализации городской дорожной инфраструктуры. Также разработаны десятки алгоритмов, решающих задачу оптимального управления дорожным трафиком, в том числе с применением искусственных нейронных сетей [1], но ни один из них на данный момент так и не признан в качестве стандарта, и, тем более, не может быть использован эффективно для регулировки движения на множестве перекрестков в пределах хотя бы одного района крупного городского поселения. Не смотря на простоту регулирования в пределах одного перекрестка, масштабирование системы управления хотя бы на порядок приводит к несоразмерному усложнению задачи, хотя при этом число параметров возрастает линейно. Это обусловлено зависимостью задержек

на сложности перекрестка, сложной моделью поведения водителей, а также разнообразием характеристик транспорта, влиянием внешней среды, дорожной обстановки, состояния дорог, времени суток и т.п. [2, 3]. Еще одним важным аспектом является разная загруженность перекрестков, что вносит в задачу элемент разбалансировки.

В связи с этим развитие теории управления транспортными потоками и проведение имитационного моделирования работы перекрестков является актуальной задачей, в том числе при планировании дорожного движения в умных городах.

Для управления транспортными потоками необходимо разработать модель с ограничениями, алгоритм функционирования в соответствии с заданной целью, критерием качества и внешними условиями. Наибольшую сложность вызывает определение: исходных данных модели, ее ограничений и критерия качества системы управления.

Определим ключевой показатель – время преодоления перекрестка. В источнике [1] определено среднее время преодоления перекрестка автомобилем, учитывающее время на разгон и время реакции водителя. Оно составляет около 5 секунд для легкового автомобиля.

В качестве критерия качества также можно воспользоваться временной функцией, когда скорость потока уменьшается до критической величины, как описано в [1], или снижением времени преодоления перекрестка автотранспортом [3], или приближение скорости потока к максимальной скорости, разрешенной правилами дорожного движения в данной местности. Еще одним вариантом критерия может служить достижение максимальной практической пропускной способности автомобильной дороги, которая зависит от полосности автомобильной дороги, приведенной в [4, 5], полученной на эталонном участке дороги при благоприятных погодных условиях и в случае, когда поток состоит только из легковых автомобилей.

Для расчетов необходимо задать величину шага регулирования Δt, исходя из полного цикла светофора T (в секундах) как суммы таймингов зеленого $t_з$ и красного сигналов светофора $t_{кр}$:

$$T = (t_з \pm \Delta t_з) + (t_{кр} \pm \Delta t_{кр}). \quad (1)$$

Установим величину шага регулирования по обоим видам сигналов $\Delta t_з = \Delta t_{кр} = 5$ с, кратной времени проезда через перекресток одного автомобиля.

Минимальное время горения светофора в красном или зеленом режиме соответствует интервалу, в течение которого пешеход должен успевать перейти проезжую часть. Исходя из методики [4] минимальное время $t_{з\ пеш\ min}$ в этом случае определяется как (для ширины пешеходного перехода не более 3 м):

$$t_{з\ пеш\ min} = (t_{реакции} + t_{н.дв.}) + l_{пеш.\ пер.}/V_{пеш} + 0{,}27N_{пеш},\ t_{реакции} + t_{н.дв.} = 3{,}2\ с, \quad (2)$$

где $t_{реакции}$ и $t_{н.дв}$ – время реакции и время, необходимое для начала движения, соответственно (с); $l_{пеш.\ пер.}$ – длина пешеходного перехода (м); $V_{пеш}$ – скорость движения пешехода по переходу (м/с); $N_{пеш}$ – количество пешеходов, проходящих переход за один цикл регулирования светофора T (1).

Скорость движения пешехода по переходу можно принять равной 1,2 м/с как минимальное значение, соответствующее наихудшим сочетаниям параметров: района города, геометрии перехода, среднестатистического возраста населения и т.п.

Количество пешеходов $N_{пеш}$ определяется как:

$$N_{пеш} = \mu_{пеш}\ T/3600,$$

где $\mu_{пеш}$ – интенсивность движения пешеходов чел/ч.

С учетом этого, (2) преобразуется как:

$$t_{з\ пеш\ min} = 3{,}2 + l_{пеш.\ пер.}/1{,}2 + 0{,}27\ \mu_{пеш}\ T/3600.$$

Для упрощения модели примем $t_{з\ пеш\ min}$ =15 с, а максимум – из соображений безопасности движения. Исходя из него необходимо, чтобы: $T <$ 240 с. Таким образом: $15 < t_з < 105$ и $15 < t_{кр} < 105$.

Воспользуемся методом Даррoха в качестве опорного, в котором учитывается интервал между подходящими к светофору автомобилями, либо длина очереди к светофору [6]. Метод относится к адаптивным и превосходит классы алгоритмов постоянного регулирования, такие как: независимого регулирования, к которому относится метод Вебстера; и координационного регулирования, к которому относятся: графоаналитический метод, «зеленая волна» и TRANSYT [7]. Метод Даррoха позволяет определить средние суммарные значения задержек транспортных средств на перекрестке со светофорным регулированием в секундах:

$$E\{W_1\} = q_1(E\{R_j\} + L)^2 + D\{R\}) / (2(1 - p_1)), \quad (3)$$

$$E\{W_2\} = q_2(E\{G_j\} + L)^2 + D\{G\}) / (2(1 - p_2)), \quad (4)$$

где q_1 и q_2 – интенсивность прибытия транспортных средств на перекресток, соответственно, с направлений 1 и 2; $E\{R_j\}$ и $E\{G_j\}$ – средние величины продолжительности горения, соответственно, красного (R) и зеленого (G) сигналов светофора в j-м цикле регулирования; L – суммарное потерянное время; $D\{R\}$ и $D\{G\}$ – дисперсии продолжительности горения, соответственно, красного (R) и зеленого (G) сигналов светофора; p_1 и p_2 – относительная интенсивность движения, соответственно, на направлении 1 и 2, определяемые как: $p_1 = q_1 / q_{m1}$ и $p_2 = q_2 / q_{m2}$, где q_{m1} и q_{m2} – интенсивность отправления транспортных средств с перекрестков, соответственно, 1 и 2.

Из выражений (3) и (4) нетрудно получить искомые величины $E\{R_j\}$ и $E\{G_j\}$, которые соответствуют таймингам горения зеленого $t_з$ и красного сигналов светофора $t_{кр}$ из нашего рассмотрения.

В качестве среды имитационного моделирования в работе использована программа AnyLogic. Для моделирования работы перекрестка и прилегающих к нему дорог необходимо воспользоваться любой программой картографирования местности, например, GoogleMaps. Для примера взят перекресток у станции метро «Московские ворота» г. Санкт-Петербурга (см. рис. 1). Он включает 26 полос движения на 5 участках дорог: дорога 1: 2 полосы к перекрестку и 0 от перекрестка; дорога 2: 4 полосы к перекрестку и 3 от перекрестка; дорога 3: 1 полоса к перекрестку и 1 от перекрестка; дорога 4: 3 полосы к перекрестку и 2 от перекрестка; дорога 5: 5 полос к перекрестку и 5 от перекрестка.

Время циклов переключений светофоров T устанавливается в начальное состояние. Затем время циклов подстраивается, исходя из модели управления фазами светофора.

Далее добавляются автомобили, как объекты; генерация производится по равновероятному закону по всем направлениям движения по полосам. Выбор маршрута движения по площади осуществляется аналогичным образом. Интенсивность потока задавалось для каждой из полос, а их назначение выполнялось случайным образом (рис. 1).

Модель перекрестка, разработанная в AnyLogic включает следующие компоненты: CarSource – 5 объектов-генераторов трафика автомобилей для соответствующего участка; StopLine – 43 регулятора очередности проезда через полосы движения перекрестков; TrafficLight –регуляторы проезда очередности проезда через перекресток в дополнительных направлениях влево и вправо; Output – объекты сбора статистики количества машин, въехавших

и выехавших с перекрестка, в том числе по дополнительным секциям светофора; Event – вызывает функции для запуска времени моделирования.

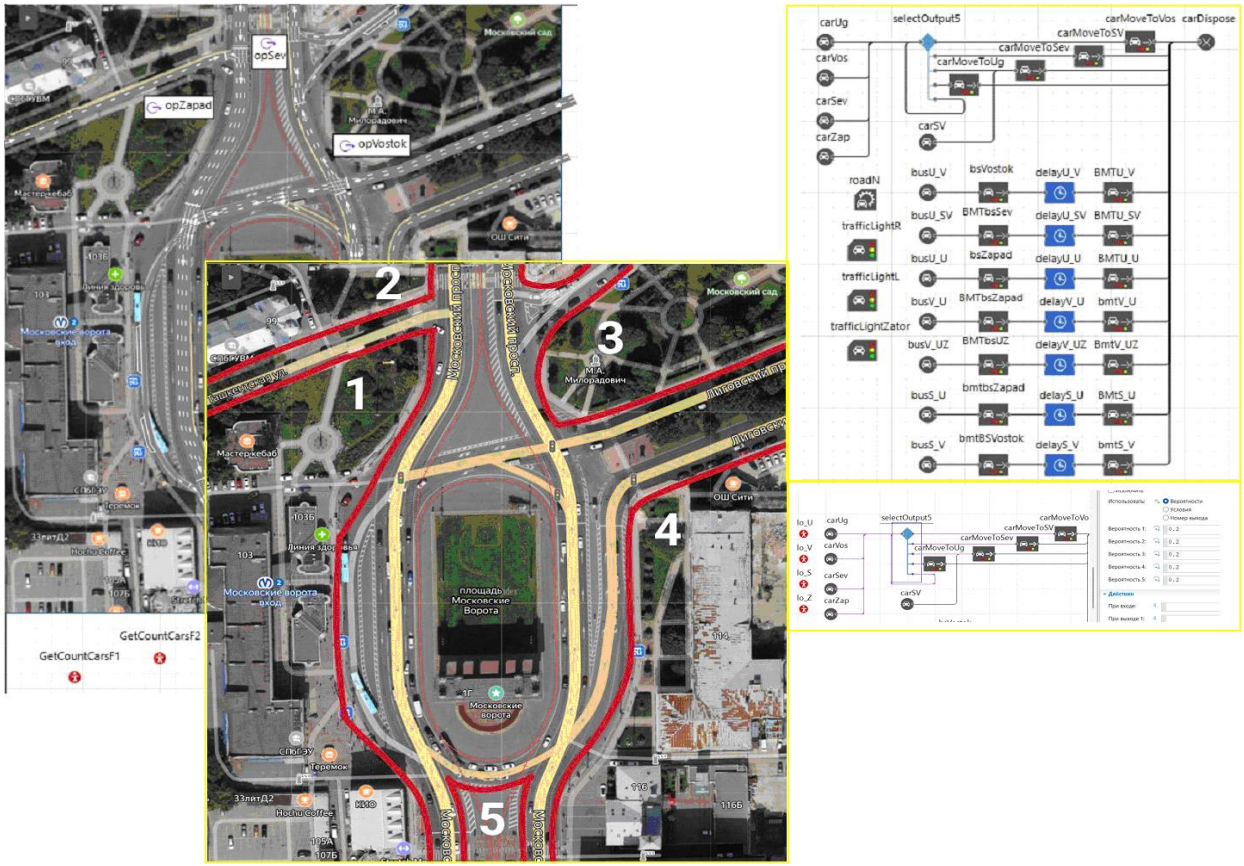


Рис. 1. Карта и настройки моделирования движения автотранспорта в среде AnyLogic

Все параметры объектов в программе AnyLogic могут задаваться как через интерфейс управления объектами, так и программным путем – с помощью языка Java.

Проведенные имитационные эксперименты показали, что для сложных перекрестков, к которым относится рассматриваемый в работе транспортный узел, модель Дарроха в ее исходном виде подходит плохо. Причина плохого регулирования транспортных потоков с помощью данной модели кроется в отсутствии учета данных о скопившемся автотранспорте на соседних перекрестках, из-за чего подстройка фаз светофоров осуществляется «вслепую», то есть локально. Для сильно загруженных перекрестков необходима коррекция приведенной модели управления движением или использование комбинированных моделей, что является темой для дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Петрушин В. А., Бугаков П. Ю. Разработка программного обеспечения на основе нейросети для оптимизации и анализа дорожного трафика//Интерэкспо Гео-Сибирь, 2020, № 1 С. 93-98.

2. Геловани В. Л., Башлыков А. А., Бритков В. Б., Вязилов Е. Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 304 с.

3. Бондаренко И. Б., Пелих Д. А. Мультиагентное планирование в управлении городской инфраструктурой // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023). Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов: в 2 т. Т. 1.; под ред. Н. Н. Иванова. Вып. 1. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2023. С. 365-368.

4. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог ОДМ 218.2.020-2012. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). 2012. 148 с.

5. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах ОДМ 218.6.003-2011. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). 2013. 69 с.

6. Титов А. Ю. Сравнительный анализ аппаратно-программных средств управления дорожным движением // XXII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. С. 8864-8870.

7. Рахмангулов А. Н., Ломакина М. Г. Выбор направления совершенствования систем светофорного регулирования транспортных потоков в городах // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2017. Т. 7. № 1. С. 27-34.

PROGRAMMING TRAFFIC CONTROL MODES AT AN INTERSECTION WITH ANYLOGIC

Bondarenko I., Paranichev A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the method of driving vehicles in multithreaded mode on an intersection model using the AnyLogic environment. Problems in organizing the movement of vehicles through a complex intersection are described. The simulation model and its components are presented. Variants of control system quality criteria are considered. Transport flow control modes can be implemented through the program interface, or programmatically in Java. The work used the Darroch model to test the operation of the control system for the selected intersection. The advantages and disadvantages of the model in managing multithreaded traffic are shown. The results of the work can be used in an automatic motion control system, as well as in areas related to the control of complex dynamic systems.

Key words: control system, traffic, model, data analysis, traffic flow, simulation, darroch model, anylogic

УДК 519.85
ГРНТИ 27.37.17

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ БАНКРОТСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. Х. Бритаева, П. В. Плотников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматриваются методы оценки вероятности банкротства предприятий, основанные на использовании количественных моделей финансового анализа. Основное внимание уделено сопоставлению классических дискриминантных моделей и современных статистических и машинно-обучаемых подходов. Показано, что практическая эффективность моделей существенно зависит от институциональной среды, структуры отчетности и отраслевой специфики. Обоснована целесообразность комбинирования нескольких инструментов анализа при принятии управленческих решений.

финансовый анализ, риск банкротства, кредитоспособность, дискриминантные модели, машинное обучение

Введение

Практический интерес к моделям прогнозирования банкротства в последние годы в России усилился в связи с санкционными ограничениями, политической нестабильностью в мире в целом, но и из-за изменения характера финансовой отчетности предприятий. В ходе прикладных расчетов исследователи часто сталкиваются с ситуациями, когда традиционные коэффициенты демонстрируют формально благоприятные значения при фактическом ухудшении платежной дисциплины. Это обстоятельство указывает на необходимость более осторожной интерпретации агрегированных показателей и подтверждает актуальность сравнительного анализа моделей.

Банкротство предприятия представляет собой юридически установленную неспособность организации выполнять денежные обязательства перед кредиторами. Несмотря на формальную правовую природу процедуры, ее предпосылки формируются задолго до наступления критической стадии и проявляются в динамике финансовых показателей.

На практике же отдельные коэффициенты редко дают однозначную картину финансового состояния. Например, компания может демонстрировать приемлемую прибыльность при недостатке оборотного капитала в силу рядя внешних факторов (санкционные ограничения). Но при этом обладать

высокой ликвидностью при снижении операционной эффективности. В подобных ситуациях аналитик сталкивается с противоречивыми сигналами, что затрудняет принятие решений.

В следствии этого в экономическом анализе получили распространение многофакторные модели, позволяющие агрегировать набор финансовых показателей в интегральный индикатор устойчивости. Такие модели снижают зависимость результатов от субъективной интерпретации и обеспечивают сопоставимость компаний между собой.

Результаты расчетов существенно зависят от национальных особенностей бухгалтерского учета, макроэкономической конъюнктуры и отраслевой структуры экономики. В связи с этим задача исследования заключается не в выборе одной наиболее точной модели, а в анализе условий их применимости.

Проведенный в работе [1] анализ подходов к критериальному оцениванию экономических рисков, послужил основанием для более детального изучения математических инструментов для оценки состояния рыночных игроков.

Классические модели прогнозирования банкротства

В прикладной аналитике классические модели чаще всего используются не как инструмент окончательного вывода, а как этап предварительной диагностики. В ряде случаев аналитики продолжают применять их по инерции, даже когда структура данных уже изменилась. Это может приводить к излишне оптимистичным оценкам устойчивости предприятий. По наблюдениям авторов, их наибольшая ценность проявляется при экспресс оценке портфеля предприятий, когда требуется быстрое ранжирование объектов анализа.

Одной из наиболее известных моделей является показатель Z-score, предложенный Э. Альтманом [2]. Модель основана на линейной комбинации финансовых коэффициентов, отражающих ликвидность, прибыльность, структуру капитала и деловую активность предприятия. Первоначально она была разработана для публичных производственных компаний, однако впоследствии появились модификации для непубличных организаций. Несмотря на возраст модели (конец 70-х XX века), она до сих пор используется как инструмент первичного анализа благодаря простоте расчета и понятной интерпретации результатов. Формально модель может быть записана как линейная функция

$$z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \cdots + a_{n-1} x_{n-1} + a_n x_n,$$

где коэффициенты определяются на основе обучающей выборки. Именно зависимость параметров от статистических данных и ограничивает гибкость модели в различных условиях. Вместе с тем перенос коэффициентов, полученных на американских данных середины XX века, на современные экономические условия приводит к снижению точности прогнозов.

К числу близких по методологии относятся модели Спрингейта [3], Таффлера и Тишоу, а также модель Лиса. Все они используют линейную дискриминантную функцию и различаются набором коэффициентов и эмпирической базой. Их преимуществом является прозрачность и понятность, однако чувствительность к изменениям отчетности ограничивает универсальность их применения.

Российские исследователи предложили собственные варианты моделей расчета риска банкротства предприятий [4], ориентированные на национальную финансовую отчетность. На практике такие модели зачастую демонстрируют более стабильные результаты при анализе отечественных предприятий, хотя и требуют периодической переоценки параметров.

Статистические и машинно-обучаемые подходы

Расширение вычислительных возможностей привело к смещению исследовательского интереса от строго линейных моделей к вероятностным и нелинейным подходам.

С развитием вычислительных методов внимание исследователей сместилось в сторону моделей, позволяющих напрямую оценивать вероятность наступления банкротства.

Логистическая регрессия (логит-модель) [5] стала одним из наиболее распространенных инструментов благодаря интерпретируемости параметров и устойчивости к умеренной мультиколлинеарности. Вместе с тем, на малых выборках результаты модели существенно зависят от выбора признаков. Это требует осторожности при интерпретации значений вычисляемых коэффициентов. В отличие от дискриминантного анализа, она позволяет моделировать вероятность события и учитывать влияние каждого признака.

Ансамблевые методы, включая случайный лес и градиентный бустинг, расширили возможности анализа за счет учета нелинейных взаимодействий между финансовыми показателями. При этом рост точности зачастую сопровождается снижением уровня интерпретируемости модели, из-за чего на практике нередко возникает необходимость дополнительного объяснения результатов для специалистов нефинансового профиля. В реальных задачах возникает проблема переобучения на исторических кризисных пери-

одах, что требует дополнительной валидации моделей на временных срезах. Практический интерес к данным алгоритмам связан с их устойчивостью к шуму и способностью работать с неоднородными выборками.

Нейронные сети применяются преимущественно при наличии больших массивов данных и временных рядов отчетности. При этом часть исследователей указывает, что выигрыш в точности не всегда оправдывает усложнение процедуры внедрения модели в корпоративную практику. Их использование позволяет выявлять сложные зависимости, однако интерпретация результатов остается затрудненной, что ограничивает применение в регламентированных процедурах кредитного анализа.

Отдельного внимания заслуживает метод оболочечного анализа [6] (Data Envelopment Analysis, DEA), оценивающий относительную эффективность предприятий. В отличие от вероятностных моделей он формирует рейтинг эффективности, позволяющий выявлять потенциально уязвимые компании внутри однородной группы.

Сравнительный анализ подходов

Сопоставление моделей показывает, что различия между ними проявляются не столько в формальной структуре, сколько в чувствительности к качеству входных данных. В условиях неполной или неоднородной отчетности более простые модели нередко демонстрируют сопоставимые результаты с более сложными алгоритмами.

Классические модели остаются востребованными благодаря простоте и минимальным требованиям к данным. Они удобны на этапе предварительной диагностики и позволяют быстро выделить предприятия с повышенным риском. Современные алгоритмы, напротив, обеспечивают более высокую точность при наличии достаточного объема информации, однако требуют настройки и проверки устойчивости результатов. Наилучшие результаты достигаются при совместном использовании нескольких методов. Когда простые модели выполняют функцию первичного фильтра, а более сложные уточняют оценку риска.

Для проверки практической применимости рассмотренных подходов авторами был выполнен демонстрационный расчет по данным среднего производственного предприятия (открытая финансовая отчетность за период 2021–2023 гг.). Цель анализа заключалась не в построении новой модели, а в сопоставлении различных методов при одинаковом наборе входных показателей.

В качестве признаков использовались коэффициенты текущей ликвидности, финансовой независимости, оборота активов, рентабельности продаж и отношение заемного капитала к собственному (таблица 1). Оценка проводилась для пяти подходов: классических Z-score Альтмана, Z-score Спрингейта, логит-модель и современных XGBoost и DEA.

ТАБЛИЦА 1. Динамика интегральных показателей по моделям (производственное предприятие, 2021–2023 гг.)

Год	Z-score Альтмана	Z-score Спрингейта	Логит-модель	XGBoost	DEA
2021	2,58	1,32	9,7 %	7,4 %	0,91
2022	2,14	1,03	21,6 %	26,8 %	0,84
2023	1,79	0,88	37,2 %	48,9 %	0,76

Полученные расхождения подтверждают, что традиционные линейные модели склонны недооценивать риски в условиях высокой макроэкономической нестабильности и структурных изменений, тогда как нелинейные алгоритмы (особенно градиентный бустинг) лучше улавливают кумулятивный эффект негативных факторов и дают более ранние и точные сигналы. При этом, различие между моделями уменьшается при снижении качества исходных данных. Этот эффект особенно заметен при наличии пропусков в отчетности. В ряде случаев классическая модель демонстрировала сопоставимые результаты при существенно меньших вычислительных затратах, что делает ее удобным инструментом предварительной диагностики.

Таким образом, даже демонстрационный анализ показывает целесообразность комбинированного применения моделей в зависимости от цели исследования и доступности данных.

Выводы

Проведенный анализ показывает, что эволюция методов прогнозирования банкротства идет по пути усложнения моделей и расширения используемых данных. Тем не менее полностью отказаться от классических подходов в ближайшее время вряд ли возможно, поскольку они обеспечивают необходимый уровень интерпретируемости.

Наиболее перспективным представляется комбинированный подход, предполагающий совместное использование традиционных финансовых

индикаторов и современных алгоритмов анализа данных. С практической точки зрения важным остается не только выбор модели, но и корректная постановка задачи, включая проверку данных, выбор периода прогнозирования и экспертную интерпретацию результатов. Такое сочетание позволяет повысить точность прогнозирования при сохранении прозрачности результатов для практического применения.

Список используемых источников

1. Плотников П. В., О. Х.-М. Бритаева Критериальное оценивание экономических рисков в условиях неопределенности // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025): Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 673-677.

2. Altman E. I. Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy // The journal of finance. 1968. Т. 23. № 4. С. 589-609.

3. Springate G. L. V. Predicting the possibility of failure in a Canadian firm: A discriminant analysis: дис. Simon Fraser University, 1978.

4. Жданов В. Ю., Афанасьева О. А. Модель диагностики риска банкротства предприятий авиационно-промышленного комплекса // Корпоративные финансы. 2011. Т. 5. № 4. С. 77-89.

5. Бурова И. В., Паничкина М. В. Экономико-математические методы в оценке финансовой устойчивости Российских банков //Фундаментальные исследования. 2021. № 3. С. 27-31.

6. Кутышкин А. В., Шульгин О. В. Использование непараметрического анализа данных для оценки эффективности муниципальных медицинских учреждений региона // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2023. Т. 23. № 1. С. 57-66.

APPROACHES TO ASSESSING ENTERPRISE BANKRUPTCY PROBABILITY BASED ON MATHEMATICAL MODELING

Britaeva O., Plotnikov P.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article paper discusses methods for assessing the likelihood of bankruptcy of enterprises based on the use of quantitative models of financial analysis. The main attention is paid to the comparison of classical discriminant models and modern statistical and machine-learning approaches. It has been shown that the practical effectiveness of models depends significantly on the institutional environment, reporting structure and industry specifics. The feasibility of combining several analysis tools when making management decisions is justified.

Key words: financial analysis, bankruptcy risk, creditworthiness, discriminant models, machine learning

УДК 332.1:519.23
ГРНТИ: 06.61.33

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ ЖИЗНИ В РОССИИ В 2020–2025 ГОДАХ НА ПРИМЕРЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

О. Х. Бритаева, Е. А. Подгорная

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлены результаты применения комплекса численных методов для оценки динамики уровня жизни населения Ленинградской области в период 2020–2025 годов. Исследование проводилось в условиях экономической турбулентности, вызванной пандемией COVID-19 и изменением внешнеэкономических условий. На основе данных Росстата, а также региональной и отраслевой статистики был проведен сравнительный анализ ключевых индикаторов: реальных денежных доходов населения, уровня бедности, коэффициента Джини, доступности социальных услуг и потребительской активности. Результаты исследования демонстрируют неоднозначную динамику. Полученные количественные оценки и построенные модели могут служить основой для разработки адресной социально-экономической политики, направленной на сглаживание региональных диспропорций и повышение устойчивости уровня жизни.

численные методы, социально-экономические индикаторы, региональная дифференциация, уровень жизни, индексный анализ, кластеризация, Ленинградская область

Актуальность исследования уровня жизни населения на региональном уровне обусловлена сохраняющейся дифференциацией субъектов Российской Федерации по социально-экономическим показателям. Как отмечается в современной литературе, усиление территориальных различий по уровню доходов относится к основным угрозам экономической безопасности регионов [1, 2]. Ленинградская область, являясь регионом-донором и одним из лидеров Северо-Западного федерального округа, представляет особый интерес для анализа, поскольку сочетает высокий промышленный потенциал с существенными внутрирегиональными различиями между городскими агломерациями и сельскими территориями [1].

Период 2020–2025 годов характеризуется беспрецедентным сочетанием внешних шоков: пандемия COVID-19, последовавший за ней экономический спад, санкционное давление и структурная трансформация российской экономики. В этих условиях оценка уровня жизни требует применения

адекватных численных методов, позволяющих не только констатировать изменения, но и выявлять факторы устойчивости и зоны риска.

1. Теоретико-методологические основы исследования

Вопросы методологии оценки уровня и качества жизни населения подробно разработаны в современной научной литературе. Меленькина С. А. и Ужегов А. О. предлагают методику интегральной оценки благосостояния населения на основе нормированных статистических индикаторов, включающих долю населения с доходами ниже прожиточного минимума, уровень закредитованности, оборот розничной торговли и соотношение заработной платы с прожиточным минимумом [3]. Данный подход представляется продуктивным для межрегиональных сопоставлений и анализа динамики.

Иванова Е. И. в своем исследовании региональных различий применяет индексный метод и метод вариационного анализа для выявления характера региональной асимметрии, а также разрабатывает суммарный индекс денежных доходов населения [2]. Автор отмечает, что с 2021 года наметилась тенденция к снижению региональных различий в отношении среднедушевых доходов к величине прожиточного минимума [2].

Для оценки уровня жизни в настоящем исследовании используется система показателей, включающая:

– реальные денежные доходы населения;
– долю населения с доходами ниже прожиточного минимума;
– коэффициент Джини;
– оборот розничной торговли на душу населения;
– обеспеченность жильем;
– доступность социальных услуг.

2. Математическая постановка задачи и методы исследования

Для количественной оценки уровня жизни населения Ленинградской области в работе применяется комплекс численных методов, включающий индексный анализ, регрессионное моделирование и кластерный анализ.

2.1. Индексный метод и нормирование показателей

Исходные статистические показатели имеют различные единицы измерения. Для приведения их к сопоставимому виду используется процедура

нормировки. В работе применяется метод линейного масштабирования (min-max) [4]:

$$I_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}} \quad (1)$$

где x_{ij} – значение i-го показателя для j -го объекта наблюдения (года или муниципального образования), x_i^{min} и x_i^{max} – минимальное и максимальное значения показателя за исследуемый период.

Для показателей – дестимуляторов (например, уровень бедности, коэффициент Джини) применяется обратное преобразование:

$$I_{ij} = \frac{x_i^{max} - x_{ij}}{x_i^{max} - x_i^{min}} \quad (2)$$

2.2. Расчет интегрального показателя уровня жизни

Интегральный показатель уровня жизни (U) рассчитывается как средняя арифметическая нормированных частных показателей [4]:

$$U = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i \quad (3)$$

где n – общее количество частных показателей, I_i – нормированное значение i-го показателя.

2.3. Регрессионный анализ

Для выявления факторов, влияющих на уровень жизни, строится множественная линейная регрессионная модель [5]. В качестве зависимой переменной Y выступает интегральный показатель уровня жизни U. Модель имеет вид:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (4)$$

где $X_1, X_2, \ldots, X_m$ – факторные признаки (уровень безработицы, инвестиции в основной капитал, бюджетные расходы на социальную политику и др.); β_0 – свободный член; $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_m$ – коэффициенты регрессии; ε – случайная ошибка модели.

Оценка параметров модели производится методом наименьших квадратов (МНК), минимизирующим сумму квадратов отклонений:

$$Q = \sum_{j=1}^{N} (Y_J - \hat{Y}_j)^2 \to \min \quad (5)$$

где Y_J – фактическое значение зависимой переменной для *j*-го наблюдения, $\hat{Y}$ – значение, предсказанное моделью, N – объем выборки.

Качество модели оценивается с помощью коэффициента детерминации R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N}(Y_J - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N}(Y_J - \bar{Y}_j)^2}, \quad (6)$$

где $\bar{Y}_j$ – среднее значение зависимой переменной.

2.4. Кластерный анализ

Для типологизации муниципальных образований Ленинградской области по уровню жизни используется метод k – средних [1]. Мера расстояния между объектами рассчитывается как евклидово расстояние:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{m}(I_{ik} - I_{jk})^2} \quad (7)$$

где I_{ik} и I_{jk}– нормированные значения k-го показателя для *i*-го и *j*-го муниципальных образований.

Метод k – средних минимизирует внутригрупповую сумму квадратов отклонений:

$$W = \sum_{l=1}^{L}\sum_{j\in C_l}\sum_{k=1}^{m}(I_{ik} - \bar{I}_{jk})^2 \quad (8)$$

где L – число кластеров, C_l – множество объектов в l – м кластере, $\bar{I}_{jk}$ – центр (центроид) l – го кластера по k -му признаку.

3. Результаты применения численных методов

3.1. Динамика реальных доходов и уровня бедности*

Анализ официальных статистических данных показывает, что пандемийный 2020 год стал точкой бифуркации для доходных показателей населения Ленинградской области. Согласно региональной программе «Снижение доли населения с доходами ниже прожиточного минимума», в 2020 году было зафиксировано снижение реальных денежных доходов до 98,2 % к предыдущему году, а реальной заработной платы – до 99,0 % [6].

Одновременно произошел скачкообразный рост уровня бедности: доля населения с доходами ниже прожиточного минимума увеличилась с 8,8 % в 2019 году до 10,2 % в 2020 году (табл. 1) [6].

ТАБЛИЦА 1. Динамика уровня бедности и реальных доходов населения Ленинградской области в 2017–2025 гг. (составлено автором по [6])

Показатель	2017	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Доля населения с доходами ниже ПМ, %	9,0	8,8	10,2	10,0	8,8	7,8	7,7	7,6
Реальные денежные доходы, % к предыдущему году	101,0	101,3	98,2	102,3	102,7	103,2	103,5	103,8

3.2. Результаты регрессионного моделирования

Для выявления факторов, определяющих уровень жизни в Ленинградской области, была построена регрессионная модель вида (4). В качестве зависимой переменной Y выбран интегральный показатель уровня жизни U, рассчитанный по формуле (3). Факторные признаки включали: уровень безработицы (X_1), инвестиции в основной капитал на душу населения(X_2), бюджетные расходы на социальную политику на душу населения (X_3), долю населения с высшим образованием (X_4).

В результате оценки параметров получено следующее уравнение:

$$\hat{Y} = 0{,}312 - 0{,}024X_1 + 0{,}003X_2 + -0{,}015X_3 + 0{,}008X_4 \qquad (9)$$

3.3. Результаты кластерного анализа

На основе нормированных показателей (формулы 1-2) была проведена кластеризация муниципальных образований Ленинградской области методом k – средних. Расстояния между объектами рассчитывались по формуле (7). Оптимальное число кластеров (L = 3) было определено на основе минимизации внутригрупповой суммы квадратов (формула 8).

Выделены следующие кластеры:

1. Кластер 1: «Пригородные территории с высоким уровнем жизни» (Всеволожский, Гатчинский, Ломоносовский районы). Характеризуются максимальными значениями доходов, высоким уровнем благоустройства жилья, развитой социальной инфраструктурой, близостью к Санкт-Петербургу.

2. Кластер 2: «Промышленные центры» (Тихвинский, Киришский, Бокситогорский районы, Сосновый Бор). Средние значения доходов, стабильная занятость в промышленности, но повышенные экологические риски и более низкие показатели доступности социальных услуг.

3. Кластер 3: «Отдаленные сельские территории» (Лодейнопольский, Подпорожский, Сланцевский районы). Низкие доходы, высокая доля насе-

ления старше трудоспособного возраста, низкая плотность населения, дефицит социальных услуг, высокий уровень бедности.

4. Динамика коэффициента Джини показывает тенденцию к незначительному росту социального неравенства. Расчет интегрального показателя уровня жизни U по формуле (3) для Ленинградской области в динамике показал, что минимальное значение (0,685) было достигнуто в 2020 году, максимальное (0,812) ожидалось к 2025 году при условии выполнения целевых показателей региональных программ [6].

Список используемых источников

1. Формирование теории кластеров для сглаживания региональной дифференциации социально-экономического развития // Russian Journal of Management. 2024. С. 169-179.

2. Иванова Е. И. Выравнивание региональных различий в уровне жизни населения в Российской Федерации: оценки и факторы // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2025. Т. 18. № 3. С. 114–135. DOI: 10.15838/esc.2025.3.99.6.

3. Каримов А. Г., Кадыров С. Х., Кабашова Е. В. Оценка уровня жизни работающего населения на основе ИЧР-подхода в регионах Приволжского федерального округа // Регион: экономика и социология. 2025. № 3. С. 163-193. DOI: 10.15372/REG20250307.

4. Меленькина С. А., Ужегов А. О. Интегральная оценка благосостояния населения регионов России: подход, динамика, интерпретация // Вестник Омского университета. Серия: Экономика. 2025. Т. 23. № 4. С. 85-95. DOI: 10.24147/1812-3988.2025.23(4).85-95.

5. Котов А. И., Полянская С. В., Ульзетуева Д. Д. Анализ влияния уровня образования на оценку качества жизни регионов Российской Федерации // Доклад конференции РГПУ им. А. И. Герцена. 2025.

6. Карпенко Е. М., Рассеко Ю. Ю. Построение интегрального показателя оценки регионального темпа жизни с использованием многомерных статистических методов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. 2022. № 5. С. 44-50. DOI: 10.52928/2070-1632-2022-60-5-44-50.

NUMERICAL METHODS FOR ASSESSING REGIONAL STANDARDS OF LIVING IN RUSSIA IN 2020–2025: CASE STUDY OF THE LENINGRAD REGION

Britaeva O., Podgornaya E.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article presents the results of applying a set of numerical methods to assess the dynamics of living standards in the Leningrad Region from 2020 to 2025. The study was conducted amid economic turbulence caused by the COVID-19 pandemic and changing external economic conditions. Using Rosstat data, as well as regional and industry statistics, a comparative analysis of key indicators was conducted: real incomes, poverty level, Gini coefficient, access to social services, and consumer activity. The study results demonstrate mixed trends. The resulting quantitative estimates and models can serve as a basis for developing targeted socioeconomic policies aimed at mitigating regional disparities and improving the sustainability of living standards.

Key words: numerical methods, socio-economic indicators, regional differentiation, standard of living, index analysis, clustering, Leningrad Oblast

УДК 623.746.4-519
ГРНТИ 28.29.27

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИНТЕРНЕТА ДРОНОВ

Р. М. Вивчарь, Е. А. Григорьев, А. В. Пачин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Концепция интернета дронов в настоящее время получила новые средства для реализации и развития. Вместе с тем, создание и эксплуатация подобных систем без точного обоснования решений по управлению являются в значительной степени рискованными. В представленной статье сформулирована задача, описаны существующие методы и инструменты моделирования систем интернета дронов, как наиболее рационального подхода к оцениванию их эффективности, а также приведены особенности процесса построения и использования моделей СИД.

интернет дронов, БПЛА, цифровые двойники, агентное моделирование, искусственный интеллект

Введение

Стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и технологий беспроводной связи привело к формированию концепции Интернета дронов (Internet of Drones, IoD), которая рассматривается как расширение парадигмы Интернета вещей (Internet of Things, IoT).

Система интернета дронов (СИД) – сложная многоуровневая кибер-физическая система позволяющая координировать множество дронов в контролируемом пространстве, обеспечивать их связь между собой, с наземными станциями, облаком и пользователями, а также предоставлять навигационные услуги, обмен данными и автономное выполнение миссий.

Концепция впервые формально предложена в 2016 году как многоуровневая архитектура управления трафиком дронов, аналогично воздушному трафику и сотовым сетям.

Пример системы IoD

Одной из реально реализованных систем Интернета дронов можно назвать сервис доставки малых грузов Wing от компании Alphabet [1]. Доставка выполняется с применением автономных БПЛА. Система Wing соче-

тает авиапарк БПЛА, наземные станции обслуживания, где происходит загрузка и выгрузка, системы планирования миссий и мониторинга полетов, а также каналы передачи данных. Wing первая получила сертификат на воздушную доставку дронами от FAA.

Согласно данным, опубликованным Wing и регуляторами, часть вычислений, требующих независимости от канала связи и имеющих жесткие временные ограничения, выполняются на борту, например, решение по возврату на базовую станцию в нештатных ситуациях, обход препятствий, шифрование и аутентификация канала связи и другое. Планирование миссий, распределение нагрузки и другие задачи, не требующие таких жестких ограничений, выполняются в облаке.

По информации с сайта компании, за все время ей удалось осуществить более 450 тысяч успешных доставок, а ежедневная нагрузка превышает тысячу доставок в день.

На этапе разработки и эксплуатации СИД существенное внимание уделяется постоянной оценке эффективности протекающих процессов. Результаты оценки являются основой для прогнозирования и принятия решений по дальнейшему развитию системы.

Задачи СИД

Основными задачами СИД являются:

1. Организация совместной работы множества БПЛА и наземной инфраструктуры в рамках единой системы.
2. Поддержка требуемых от системы характеристик качества и эффективности.
3. Построение и изменение топологии сети.
4. Распределение подзадач между дронами, построение маршрутов для их выполнения, ретрансляция.
5. Оптимизация расчетов, передачи данных, распределения маршрутов для достижения большей энергоэффективности.
6. Обеспечение безопасности работы системы, защита каналов передачи данных от несанкционированного доступа и защита от внедрения вредоносных дронов злоумышленниками.

Архитектура СИД

Современные исследования [2-5] предлагают 5-уровневую общую архитектуру СИД:

1. Физический уровень (Perception Layer): включает все материальные компоненты СИД: сами БПЛА, базовые станции, наземные средства управления, сенсоры, исполнительные механизмы.

2. Канально-сетевой уровень доступа (Link / Access Layer): отвечает за организацию доступа к среде и устойчивость обмена на локальном уровне: доступ к каналу связи и поддержка устойчивых связей “дрон–дрон” и “дрон–земля”. Обеспечение QoS на уровне канала.

3. Сетевой уровень (Network Layer):

3.1. FANET (Flying Ad-hoc Network): дроны образуют летающую сеть.

3.2. Связь: 5G/6G, спутниковая связь (LEO/GEO спутники), LoRaWAN для телеметрии.

3.3. Поддержание связности при постоянной смене топологии.

3.4. Механизмы устойчивости к разрывам маршрутов.

4. Уровень обработки и сервисов данных (Processing / Middleware / Edge-Fog-Cloud Layer): здесь размещаются функции, связанные с обработкой данных (например, определение текущего местоположения, решение на облет препятствий) и вычислительным контуром, позволяющим выполнять все расчеты на нижнем уровне системы – на дронах или наземных станциях. На этом уровне может происходить диспетчеризация задач между БПЛА (task allocation), то есть их распределение между исполнителями.

5. Прикладной уровень / уровень приложения (Application layer): приложения оператора, сервисного инженера, клиента, где могут указываться цели миссии и регуляторные/эксплуатационные ограничения, а также задаваться целевые метрики эффективности и отображаться текущие.

Эффективность СИД

Эффективность системы является сложным комплексным показателем [6], и оценивается по следующим компонентам:

1. 1. Результативность

Определяется функциями СИД и показателями, характеризующими степень достижения требуемого результата.

Основные – вероятность выполнения миссии (доставки груза, поиска объекта на заданной территории) за минимальное время с учетом ограничений на ресурсы (заряд батареи в первую очередь).

Кроме того, могут оцениваться такие показатели как степень покрытия заданной территории, задержки передачи данных, пропускная способность, надежность доставки и энергоэффективность сети.

2.2. Оперативность

Показатели, характеризующие необходимые для достижения результата временные затраты. Наиболее значимыми являются следующие:

– время выполнения миссии;
– время автономного полета;
– время перезарядки;
– время ТО;
– время ремонта.

3. Ресурсоемкость

Выраженные в реальных или условных единицах:

– стоимость дронов и иных компонент СИД;
– стоимость инфраструктуры;
– стоимость ТОиР.

4. Безопасность

Вероятностные показатели:

– характеризующие информационную безопасность;
– характеризующие риски для безопасности жизни и здоровья персонала, клиентов и третьих лиц.

Задача моделирования СИД

Очевидно, что создание и эксплуатация подобных сложных и дорогостоящих систем несет в себе значительные риски. Реальные эксперименты в случае с IoD являются, очевидно, трудоемкими, технически сложными и дорогостоящими.

Как следствие, моделирование становится основным инструментом исследования СИД.

Модель СИД можно описать следующим образом:

S – объект моделирования, СИД как множество связанных дронов, наземных станций (стационарных и подвижных) и инфраструктуры управления;

X – множество входных (управляемых) параметров модели (количество и типы дронов, их текущие и начальные координаты, режимы полета, тип задачи, расположение наземных станций, протоколы управления и т.п.);

Y – множество выходных (наблюдаемых) параметров;

Z – множество внутренних параметров системы, в том числе динамических (статус миссии, заряд батарей, состояние каналов связи, скорости, высоты, курсы полетов);

E – множество параметров (неуправляемых) внешней среды (погода, электромагнитная обстановка, рельеф местности и застройка, воздействие регуляторов);

Q – множество показателей эффективности СИД, являющееся предметом исследования.

Условия физической реализуемости, т.е. ограничения, заданы следующим образом:

$$X \subseteq X_{\text{доп}},\ Y \subseteq Y_{\text{доп}},\ Z \subseteq Z_{\text{доп}},\ E \subseteq E_{\text{доп}}$$

Вербально задача создания модели СИД, в самом общем виде, формулируется следующим образом: разработать модель μ системы интернета дронов, отражающую закономерность изменения множеств выходных параметров Y и показателей эффективности системы Q от значений входных параметров X, внутренних параметров Z и параметров среды E.

Формально задача выглядит следующим образом:

$$\mu\colon (S, X, Z, E) \longrightarrow Y, Q \mid X \subseteq X_{\text{доп}},\ Y \subseteq Y_{\text{доп}},\ Z \subseteq Z_{\text{доп}},\ E \subseteq E_{\text{доп}}$$

Обзор методов моделирования СИД

Для моделирования сложных динамических технических систем создана обширная методология [7-9], включающая методы аналитического (дифференциальные, интегральные, разностные уравнения), имитационного, агентного моделирования, а также различные гибридные подходы.

В соответствии с архитектурой, динамикой и задачами СИД наиболее рациональным методами для их моделирования являются создание цифровых двойников и агентное моделирование

Цифровые двойники (Digital Twins) как интеграция математической (имитационной) модели с данными реального времени от датчиков (IIoT) для предиктивного управления;

Агентное моделирование используется для моделируется поведение отдельных элементов СИД как автономных агентов.

Особенности моделирования СИД

Как следует из концепции, СИД – это система множества дронов, обладающих автономностью.

И цифровые двойники и агенты модели должны обладать интеллектуальными свойствами:

– анализ обстановки, определение местоположения;
– принятие решений по дальнейшей деятельности;
– самообучение.

По сути, модель СИД, как и сам объект моделирования, должны стать мультиагентной системой ИИ – “коллективом” специализированных ИИ-агентов, которые постоянно обмениваются информацией для решения задач [10-11].

Помимо непосредственно агентов модель СИД также должна включать компоненты, позволяющие выполнять комплексное моделирование:
– динамики полетов;
– данных от сенсоров дронов и наземного оборудования;
– состояния сети передачи данных;
– окружающего мира.

В настоящее время имеется ряд инструментов, позволяющих с высокой адекватностью проводить исследования СИД. Наиболее популярными являются платформы Modifly, Gazebo, AirSim и OmniDrones. Данные приложения предоставляют широкий набор функций для моделирования СИД, в том числе и интеграции ИИ.

Процесс построения таких моделей, очевидно, имеет и ряд проблем, в первую очередь это проблема валидации, особенно на этапе проектирования системы. Также “узким местом” являются требуемые значительные вычислительные ресурсы.

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что наиболее перспективными исследованиями в сфере моделирования СИД будут исследования, направленные на:

а) создание пилотных упрощенных моделей с использованием различных инструментов;

б) сравнительный анализ доступных инструментов моделирования;

в) создание методик квалиметрии моделей СИД, оценивания их адекватности;

г) создание методик оценивания различных показателей эффективности СИД с применением моделей;

д) создание комбинированных моделей, включающих аналитические компоненты, ИИ-агентов и цифровых двойников;

е) создание собственных платформ для моделирования и управления СИД.

Заключение

На современном уровне развития технологий открыты новые возможности для различного рода реализаций концепции интернета дронов. Вместе с тем сложность этих объектов определяет критическую важность использования моделирования на всех этапах создания и эксплуатации.

При этом моделирование СИД имеет ряд особенностей, в первую очередь связанных с необходимостью построения таких моделей как полимодельных комплексов, включающих множество интеллектуальных агентов и высокоточных цифровых двойников. Исследования, связанные с построением и оцениванием качества подобных моделей, являются в значительной степени актуальными.

Список используемых источников

1. Wing: официальный сайт компании. URL: https://wing.com/ (дата обращения: 13.02.2026). Текст: электронный.

2. Gharibi, M. Internet of Drones / M. Gharibi, R. Boutaba, S. L. Waslander // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 1148–1158. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2537208. URL: https://arxiv.org/abs/1601.01289 (дата обращения: 13.02.2026).

3. Lagkas, T. An Extensive Survey on the Internet of Drones / T. Lagkas, V. Argyriou, P. Sarigiannidis [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, no. 1. P. 302–332. DOI: 10.1109/COMST.2020.3034011. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 343228784_An_Extensive_Survey_on_the_Internet_of_Drones (дата обращения: 13.02.2026).

4. Mishra, D. Drone Networking in 6G Era: A Technology Overview / D. Mishra, A. M. Vegni, V. Loscrì, E. Natalizio // IEEE Communications Standards Magazine. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 88–95. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100016. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9665313 (дата обращения: 13.02.2026).

5. Global State of Drones 2025: Industry Whitepaper / Drone Industry Insights. Hamburg: Droneii, 2025. 15 p. URL: https://droneii.com/project/global-state-of-drones-2025-2 (дата обращения: 13.02.2026). Текст: электронный.

6. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. В 3 ч. Ч. 1. Методология, методы, модели / Г. Б. Петухов. Москва: Изд-во Министерства обороны СССР, 1989. 660 с.

7. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев; под науч. ред. проф. А. Боровкова. Москва: АльянсПринт, 2020. 401 с. ISBN 978-5-9906465-2-0.

8. Городецкий В. И. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем / В. И. Городецкий, О. Л. Бухвалов, П. О. Скобелев // Управление большими системами: сборник трудов. 2017. № 66. С. 94-157. EDN YZAKOV. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29658457 (дата обращения: 13.02.2026).

9. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем: от клеточных автоматов до дискретно-событийных моделей / Ю. Г. Карпов // Компьютерные инструменты в образовании. 2019. № 3. С. 15–28.

10. Городецкий В. И. Наука о данных: методология, основные направления, проблемы и перспективы / В. И. Городецкий // Искусственный интеллект и принятие реше-

ний. 2022. № 3. С. 3-20. DOI 10.14357/20718594220301. EDN CXNNWR. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49473932 (дата обращения: 13.02.2026).

11. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации и управления ресурсами / П. О. Скобелев. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. 258 с. ISBN 978-5-93424-686-2.

SOME ASPECTS OF MODELING INTERNET OF DRONES SYSTEMS

Vivchar R., Grigorev E., Pachin A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The concept of the Internet of Drones (IoD) has recently gained significant momentum in both research and practical implementation. However, the design and deployment of such systems without rigorous justification of control and management strategies entail substantial risks. This article reviews existing methods and tools for modeling Internet of Drones systems as the most rational approach to assessing their effectiveness. It also presents the features of the process of constructing and using IOS models.

Key words: Internet of Drones, UAV, digital twins, agent-based modeling, artificial intelligence

УДК 004.946
ГРНТИ 28.17.33

ОЦЕНКА ВОСПРИЯТИЯ И ПОНИМАНИЯ ДАННЫХ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ИНФОГРАФИКИ В СРЕДЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Д. В. Волошинов, М. В. Мельников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Целью работы является систематизация подходов к планированию и проведению экспериментов, связанных с объективной оценкой восприятия и понимания данных, представленных в виде VR-инфографики. Отмечается необходимость перехода от субъективных оценок работы с данными в среде виртуальной реальности к получению объективных и измеримых значений. Предлагается использование двух этапов оценки: предварительное анкетирование и практический эксперимент с использованием оборудования. Особое внимание в работе уделяется определению набора метрик. В статье сформулированы гипотезы, проверка которых позволяет оценить влияние факторов иммерсивной среды на восприятие и понимание информации пользователем.

инфографика, виртуальная реальность, информация, данные, восприятие данных, иммерсивная среда.

Технология виртуальной реальности (VR) открывает новые возможности наглядного представления сложных, объемных, многомерных данных и взаимосвязей между ними посредством отображения интерактивной инфографики в иммерсивной среде.

Следует заметить, что взаимодействие с VR отличается от традиционных форм человеко-машинного взаимодействия ввиду иммерсивности, характера сенсорного восприятия среды, когнитивной нагрузки, интенсивности взаимодействия и степени иллюстративности.

Восприятию среды виртуальной реальности пользователем, а также особенностям взаимодействия с представленными в ней объектами посвящен ряд публикаций отечественных исследователей.

П. М. Фишов считает, что восприятие среды виртуальной реальности основывается на индивидуальной реакции пользователя [1]. Он выдвигает предположение, что основным фактором, отвечающим за эффективность систем виртуальной реальности, является ее содержание.

Работа с виртуальной реальностью может вызывать у пользователя эмоциональные реакции. Эмоциональный контекст важен в вопросе мотивации человека к изучению и запоминанию данных. Н. В. Авербух и А. А. Щербинин отмечают, что психологические факторы влияют на готовность взаимодействия со средой виртуальной реальности [2]. Исследователи провели тест «кубики Коса» с использованием стереоочков. Результаты исследования показывают, что средство отображения влияет не на время или правильность выполнения задания, а на саму способность решения задачи.

М. С. Сергеева и др. провели исследование особенностей сложной сенсомоторной реакции на релевантные стимулы персонализованной виртуальной реальности у молодых людей [3].

М. В. Коломеец представляет результаты экспериментов по тестированию восприятия 12 компонентов визуализации в виртуальной реальности на основе слепого тестирования 20 пользователей [4].

Несмотря на то, что эффективность визуализации сложно оценить и формализовать, исследователь выделяет два объективных измеряемых показателя: точность интерпретации информации и скорость принятия решения.

Исследование показывает, что точно интерпретируются форма, основной цвет, вращение, масштабирование и движение. С погрешностями – размер, прозрачность, текстура. Неточно в VR воспринимаются оттенок цвета и его насыщенность.

Визуализации данных и использованию в VR в практической деятельности в целом посвящен ряд научных публикаций, однако в исследованиях встречаются субъективные оценки целесообразности такого подхода к графическому представлению информации.

Для изучения восприятия и понимания данных, представленных с помощью VR-инфографики, предлагается использование двух этапов оценки: предварительное анкетирование и практический эксперимент с использованием оборудования.

На первом этапе респондентам предлагается ответить на ряд вопросов, касающихся следующих аспектов: общий опыт использования VR, эмоциональные и физические аспекты, а также отношение к применению VR-технологий.

Вопросы должны быть направлены на выявление субъективных ощущений пользователей относительно эмоциональной реакции на использование технологии, ощущения эффекта присутствия, наличия и степени выра-

женности физических и психологических последствий, а также скорости адаптации к взаимодействию с представленными в среде виртуальной реальности объектами. Кроме того, анкетирование должно включать блок вопросов, направленных на оценку возможностей виртуальной реальности как инструмента наглядного визуального представления данных.

Вторая часть исследования – экспериментальная оценка влияния среды виртуальной реальности на восприятие данных человеком.

Авторами работы был проведен эксперимент по оценке восприятия данных с временной привязкой на интерактивном таймлайне в VR.

Для оценки разработано веб-приложение, отображающее данные и их взаимосвязи, а также характеризующиеся дополнительным параметром – категорией, к которой относится представленный объект.

Участникам было предложено изучить данные, представленные на интерактивном таймлайне по теме «История развития информационных технологий».

Эксперимент позволяет оценить следующие аспекты взаимодействия:

– способность человека корректно определять последовательность событий и их положение на временной ленте;
– запоминаемость представленных в VR данных;
– взаимосвязь данных, способность пользователя выявлять закономерности, тенденции и зависимости среди большого объема информации;
– субъективная оценка пользователями удобства изучения данных, представленных в среде виртуальной реальности и др.

После ознакомления с данными, представленными в среде VR, участникам эксперимента было предложено ответить на ряд вопросов, позволяющих оценить способность пользователя выявлять закономерности, тенденции и зависимости среди большого объема информации.

Отдельный блок вопросов выделен для анализа субъективных ощущений пользователей при работе в VR и определения факторов, которые могут негативно влиять на восприятие информации.

Результаты эксперимента показывают, что VR-технологии обладают значительным потенциалом для улучшения восприятия сложных данных, связей, структур и зависимостей. Использование VR стимулирует познавательную деятельность и вызывает у пользователей преимущественно положительный эмоциональный отклик. Согласно субъективным оценкам респондентов, представление данных в трехмерном пространстве среды виртуальной реальности упрощает понимание связей данных.

Рассмотренные аспекты обуславливают необходимость перехода от субъективных оценок работы с данными в среде виртуальной реальности к получению объективных и измеримых значений с целью изучения процессов восприятия информации, представленной с помощью VR-инфографики.

Эксперимент должен представлять собой контролируемую VR-сессию, в ходе которой пользователь взаимодействует с инфографикой, выполняет целевые задания, а исследователь при этом регистрирует набор объективных и субъективных показателей.

Для VR-представления целесообразно выбирать:

– данные с временной привязкой (таймлайны) – последовательность событий, длительности интервалов, одновременности и причинно-следственных связей;
– сетевые и иерархические структуры – визуализация графов, деревьев, связей между объектами;
– многомерные и категориальные данные – пространственное размещение позволяет кодировать несколько измерений непосредственно координатами, а дополнительные атрибуты – цветом, формой, размером объектов.

Можно выделить следующие типы задач, которые предлагается выполнить участникам эксперимента:

– задачи на восприятие направлены на оценку способности пользователя обнаруживать и различать визуальные элементы: обнаружение цели (найдите событие, относящееся к категории), различение категорий (к какой категории относится выделенный объект), оценка пространственных характеристик (какой объект расположен дальше, какой объект крупнее и т.п.)
– задачи на память позволяют оценить, насколько хорошо информация закрепляется в кратко- и долговременной памяти. Например, «какие из перечисленных элементов представлены в инфографике», «назовите события, произошедшие в 2010-2022 гг.)
– задачи на понимание и выявление связей: установление последовательности, обобщение и выделение тенденций, прогнозирование и т.п.

Ответы на вопросы необходимо кодировать в количественные показатели. Например, критерий «глубина понимания» по шкале от 0 до 3, где 0 – связь не найдена, 1 – найдена поверхностная связь, 2 – указана промежуточная связь, 3 – представлена развернутая причинно-следственная цепочка.

Регистрация объективных показателей непосредственно связана с программным средством, используемым для эксперимента. Приложение должно регистрировать следующие параметры:

– время реакции (Reaction Time, RT) – интервал между предъявлением стимула и началом ответной реакции пользователя;
– точность выполнения (Accuracy) – доля правильных ответов, количество и тип ошибок;
– время выполнения задачи (Task Completion Time) – общее время, затраченной на выполнение задания;
– траектория навигации и перемещения пользователя в иммерсивном пространстве.

Выделим некоторые исследовательские гипотезы:

1. Присвоение данным различной семантической формы (куб, сфера, пирамида) значительно улучшит скорость их опознания и группировки пользователем по сравнению с использованием унифицированной формы.

2. Расположение взаимосвязанных данных в плотные пространственные кластеры в соответствии с законом близости значительно снизит когнитивную нагрузку и повысит точность ответов на вопросы о взаимосвязях по сравнению со случайным или равномерным распределением тех же данных в пространстве.

3. Использование пространственного звука, совпадающего по локации с визуальным событием, статистически значимо уменьшит время поиска этого события в сложной VR-сцене по сравнению с условием без звука.

4. Возможность активно манипулировать параметрами визуализации в реальном времени значительно увеличит глубину понимания сложных взаимосвязей по сравнению с пассивным наблюдением заранее подготовленной анимации.

Предложенные в работе подходы позволяют провести комплексное исследование с целью оценки влияния факторов иммерсивной среды на восприятие, понимание и запоминание данных, представленных с помощью VR-инфографики.

Полученные в ходе экспериментов результаты позволят сформулировать практические рекомендации по проектированию VR-инфографики, направленной на упрощение восприятия сложных структур и зависимостей в объемных многомерных данных.

Список используемых источников

1. Фишов П. М. Виртуальная реальность в контексте эмпирической вовлеченности // Философия образования. 2014. № 4 (55). URL: https://www.sibran.ru/journals/ issue.php?ID=161704&ARTICLE_ID=161724 (дата обращения: 01.02.2026).

2. Авербух Н. В., Щербинин А. А. Феномен присутствия и его влияние на эффективность решения интеллектуальных задач в средах виртуальной реальности // Психология. Журнал ВШЭ. 2011. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-prisutstviya-i-ego-vliyanie-na-effektivnost-resheniya-intellektualnyh-zadach-v-sredah-virtualnoy-realnosti (дата обращения: 02.02.2026).

3. Сергеева М. С., Коровина Е. С., Романчук Н. П. [и др.] Особенности сложной сенсомоторной реакции на релевантные стимулы персонализованной виртуальной реальности у молодых людей // Наука и инновации в медицине. 2019. Т. 4. № 3. С. 36-40.

4. Коломеец М. В. Эффективность визуализации данных в виртуальной реальности // Приборостроение. 2020. № 11. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-vizualizatsii-dannyh-v-virtualnoy-realnosti (дата обращения: 06.02.2026).

ASSESSMENT OF PERCEPTION AND UNDERSTANDING OF DATA PRESENTED USING INFOGRAPHICS IN A VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT

Voloshinov D., Melnikov M.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The aim of the work is to systematize approaches to planning and conducting experiments related to the objective assessment of perception and understanding of data presented in the form of VR infographics. It is noted that there is a need to move from subjective assessments of working with data in a virtual reality environment to obtaining objective and measurable values. It is proposed to use two stages of assessment: a preliminary questionnaire and a practical experiment using equipment. Special attention is paid to defining a set of metrics and processing the results obtained. The article formulates hypotheses, the verification of which makes it possible to assess the influence of color, shape, sound and other factors of the immersive environment on the perception and understanding of information by the user.

Key words: infographics, virtual reality, information, data, data perception, immersive environment

УДК 004.27
ГРНТИ 14.85.35

АДАПТАЦИЯ СРЕДСТВ ВИРТУАЛИЗАЦИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

И. В. Гвоздков, А. И. Ликарь, Ю. Я. Перевозник

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Переход на российское программное обеспечение согласно Федеральному закону от 07.04.2025 № 58-ФЗ, с 1 сентября 2025 года, требует прекратить использование иностранного программного обеспечения. На сегодняшний день в СПбГУТ действуют договора на использование таких операционных систем как Astra, ALT, RedOS. Возможность использования этих операционных систем и специального программного обеспечена входящих в них требует помимо их установки на рабочие станции: обучения преподавателей, корректировки учебных программ и методических материалов дисциплин. Предложения по адаптации предложенных средств виртуализации разработчиками этих операционных систем будут рассмотрены в статье.

операционная система, виртуализация, виртуальные машины, программное обеспечение, адаптация

Отказ западных компаний от поддержки продуктов на территории России повлиял на скорость перехода на отечественное программное обеспечение. Разработчики операционных систем стремятся ускорить процесс адаптации программного обеспечения.

Переход на российское программное обеспечение согласно Федеральному закону от 07.04.2025 № 58-ФЗ, с 1 сентября 2025 года, требует прекратить использование иностранного программного обеспечения.

На сегодняшний день в СПбГУТ действуют договора на использование таких операционных систем как Astra, ALT, RedOS.

Возможность использования этих операционных систем и специального программного обеспечена входящих в них требует помимо их установки на рабочие станции: обучения преподавателей, корректировки учебных программ и методических материалов дисциплин.

Предложения по адаптации предложенных средств виртуализации разработчиками этих операционных систем будут рассмотрены в статье.

Целью статьи является анализ того, как виртуализация влияет на методологию обучения, взаимодействие между преподавателями и обучаемыми

и качество образовательного процесса. В исследовании предлагаются практические, аппаратные, программные пути использования виртуальных машин и среды в учебном процессе. Виртуальная настольная инфраструктура предоставляет доступ к виртуальным приложениям и персонализированным виртуальным рабочим столам в аудиториях учебного заведения так и за его пределами.

Предлагается новый подход к созданию среды облачной виртуализации для сетевой инфраструктуры образовательного учреждения, которая основана на совместном использовании технологий виртуализации и программных сетей. Этот подход позволяет вам объединить процесс создания сетевой инфраструктуры, масштабировать ресурсы, предоставляемые по требованию с минимальными организационными и техническими затратами.

Использование технологий виртуализации позволяет объединить процесс создания сетевой инфраструктуры, масштабировать ресурсы, предоставляемые по требованию с минимальными организационными и техническими затратами, адаптируя виртуальную инфраструктуру к требованиям конкретного учебного заведения.

Образовательный процесс в виртуальном образовательном пространстве, который стал необходимым педагогическим инструментом в контексте сегодняшних задач, станет стимулом для улучшения задач, критериев, принципов и функциональности творческой среды как фактора инновационного развития.

Виртуализация – это концепция, в которой несколько гостевых операционных систем используют аппаратного обеспечение одного устройства. Виртуализация сервера – это широко используемый тип виртуализации, в котором каждая операционная система считает, что она имеет единственный контроль над базовым оборудованием. Виртуализация сервера уже получила свое место в компаниях. Высшие учебные заведения также начали мигрировать на виртуализированные серверы. Мотивация для институтов высшего образования принять виртуализацию сервера заключается в сокращении поддержания инфраструктуры сложных информационных технологий.

Виртуализация позволяет организациям сокращать расходы, избегая создания большего пространства центра обработки данных. Консолидация сервера приносит пользу образовательным институтам за счет снижения затрат на энергию, смягчения технического обслуживания, оптимизации ис-

пользования оборудования, обеспечивая ресурсы для исследований. Поскольку гибридный режим обучения набирает обороты, онлайн -режим преподавания и работы из домашних вариантов может быть – включен с укрепленной инфраструктурой. [1].

Виртуализации образовательной среды необходима:

– экономия средств на выделение оборудования (персональных компьютеров) и компьютерных классов только для специфических программных продуктов;

– расширяем возможности использования специализированных лабораторий для общего доступа с возможностью адаптации, масштабируемости, доступности к индивидуальным потребностям изучаемых дисциплин;

– в связи с необходимостью постоянно растущих требований программного обеспечения регулярно обновлять компоненты компьютеров и приобретать лицензии на каждое рабочее место;

– для обучения студентов требуется проводит работы на одном компьютере с различными версиями операционных систем и специального программного обеспечения, в том числе экспериментальные, давать навыки работы с ними, сохранив работоспособность устройства;

– уменьшение рабочего времени на настройку оборудования компьютерных классов;

– отладка одного виртуального компьютера преподавателем профильных дисциплин, с помощью средств виртуализации позволяет тиражировать программы.

Таким образом это ключевая тенденция в сфере современных образовательных методологий позволяет более эффективно использовать время на подготовку к занятиям, как преподавателей, так и время на подготовку, обслуживание оборудования и программного обеспечения компьютерных классов техническим персоналом.

На сегодняшний день в СПбГУТ развернут и функционирует компьютерный класс «Астра». Его использование предусматривает подготовку студентов по дисциплинам двух факультетов. Это много в плотном графике расписания занятий со студентами.

Заключен договор с «Базальт СПО» на развертывание компьютерного класса на 15 рабочих мест и сервера.

Эффективное использование серверного оборудования для учебного процесса предусматривает. Использование собственного сервера и облач-

ного дает свои плюсы и минусы. Рассмотрим их применительно к учебному процессу вуза.

Собственный сервер:

– варианты использования;

– вендоры;

– безопасность;

– способы подключения.

Облачные сервисы (серверы). Преимущества как у своих серверов, с возможностью подключения из вне для дистанционного обучения.

Варианты использования, например, по назначению, форм-фактору, операционной системе или уровню производительности.

По назначению Веб- серверы и Почтовые серверы, файловые серверы, серверы приложений серверы баз данных серверы рабочей группы, ориентирован на управление доступом к общим ресурсам внутри организации, серверы контроллера домена [2].

По операционной системе. Серверные операционные системы классифицируют по назначению и лицензированию:

Системы общего назначения – подходят для выполнения различных задач и могут использоваться в качестве веб-серверов, почтовых серверов и баз данных. Примеры: Windows Server, Ubuntu Server, CentOS. Специализированные серверные ОС – разрабатываются для выполнения конкретных задач или для работы с определенными аппаратными средствами. Например, для работы с сетевым оборудованием или для телекоммуникационных серверов. [3].

По лицензированию:

Коммерческие (закрытые) операционные системы – требуют оплаты за использование и техническую поддержку. Примеры: Microsoft Windows Server, Red Hat Enterprise Linux.

Открытые (бесплатные) операционные системы – предоставляются с открытым исходным кодом и могут свободно использоваться, модифицироваться и распространяться. Примеры: Ubuntu Server, Debian, FreeBSD.

Полукоммерческие системы – некоторые операционные системы могут быть доступны как с бесплатными версиями, так и с платными, предоставляющими дополнительные функции и поддержку.

Вендоры на сегодняшний день в вузе определены, это Astra, ALT, RedOS.

Безопасность занимает ключевое место. Она определяется разработчиком операционной системы и настройкой политик безопасности администратором сервера исходя из текущих требований.

Способы подключения через веб-интерфейс или командную строку [4].

Сейчас в реестре российского программного обеспечения 60 разработчиков операционных систем, порядка 50 производителей виртуализации.

Необходимость виртуализации образовательной среды, с использованием виртуальных учебных платформ способствуют разработке совместного обучения и независимости учащихся.

«Альт Виртуализация» – серверный дистрибутив на базе ядра Linux для предоставления функций виртуализации и контейнеризации в корпоративной инфраструктуре от российского разработчика «Базальт СПО». Входит в Единый реестр российского программного обеспечения.

«Альт Виртуализация» поддерживает несколько сценариев использования:

– базовая виртуализация (для контура с небольшим количеством ВМ);

– классическая виртуализация с изолированными виртуальными машинами и контейнерами;

– облачная виртуализация;

– контейнеризация.

Для масштабирования учебных классов на базе виртуальных машин предлагаются следующие решения:

Клонирование виртуальной машины. Решение поддерживает клонирование ВМ, создание клона происходит без выключения. Также есть возможность создания связанных клонов в арсенале «Альт Виртуализации» есть возможность создания мгновенных снимков, снапшотов с сохранением оперативной памяти. Живая миграция виртуальной машины поддерживается даже при наличии мгновенных снимков.

При удалении снимка виртуальной машины продолжает свою работу.

Создание виртуальной машины из образа является основным способом быстрого создания виртуальной машины, при этом изменить параметры создаваемой виртуальной машины возможно только после окончания процесса.

Группировка виртуальных машин возможна по папкам, в пул.

Живая миграция виртуальной машины. Живая миграция работает между узлами и хранилищами.

Горячее изменение ресурсов. Возможность горячего изменения ресурсов виртуальной машины есть.

В статье рассмотрены актуальные вопросы виртуализации сетевой инфраструктуры учреждений образования. Проведен анализ внедрения с учетом возможностей существующих в вузе ресурсов. Предложен подход к созданию среды виртуализации сетевой инфраструктуры учреждения образования, который основан на совместном использовании технологий виртуализации, что позволяет унифицировать процесс создания сетевой инфраструктуры, масштабировать предоставляемые ресурсы по требованию с минимальными организационными и техническими затратами, адаптировать виртуальную инфраструктуру к требованиям конкретного учреждения образования.

Список используемых источников

1. Инфраструктура и архитектура виртуализации: [Электронный ресурс]: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2021. 224 с. URL: https://e.lanbook.com/book/246038. (дата обращения: 17.02.2026).

2. Бухарин В. В., Прощенков В. М. Использование сетевых прикладных платформ в автоматизированных системах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2024. Т. 2. С. 576–579.

3. Зылева П. С., Пестов И. Е., Тремель И. С., Юрова У. С. Сравнение систем виртуализации ПК СВ «Брест» и VMware // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2023. Т. 2. С. 546–552.

4. Концепции программного управления и виртуализации сетевых сервисов в современных сетях передачи данных: учебное пособие / Р. Л. Смелянский, В. А. Антоненко; рец. С. Э. Харужинский. М.: КУРС, 2021. 160 с.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры СОД СПбГУТ, кандидатом технических наук, В. А. Медведевым.

ADAPTATION OF VIRTUALIZATION TOOLS IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Gvozdkov I., Likar A., Perevoznik Yu.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

According to Federal Law N 58-FZ of April 7, 2025, as of September 1, 2025, the use of foreign software must be discontinued.

Currently, St. Petersburg State University of Technology has agreements in place for the use of operating systems such as Astra, ALT, and RedOS.

In addition to installing these operating systems on workstations, the use of these operating systems and their associated software requires the training of faculty members, the adjustment of curricula, and the development of teaching materials.

The article will consider proposals for adapting the proposed virtualization tools by the developers of these operating systems.

Key words: operating system, virtualization, virtual machines

УДК 004.89
ГРНТИ 28.23.24

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АРХИТЕКТУР RAG-СИСТЕМ

А. Н. Губин, В. Л. Литвинов, Ф. В. Филиппов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

RAG (Retrieval-Augmented Generation) – это гибридный подход, объединяющий генеративные языковые модели и механизмы извлечения релевантной информации из внешних источников данных. Основной целью таких систем является улучшение качества генерации языковой модели за счет доступа к актуальным данным, которые могут не содержаться в обучающей выборке. Благодаря своей способности сочетать обширные знания больших языковых моделей с актуальной информацией из внешних источников, RAG находит широкое применение в самых разных областях, включая вопросно-ответные системы, анализ временных рядов, улучшение точности в юридических исследованиях и т.д. В работе дан сравнительный анализ передовых архитектур RAG.

большие языковые модели (LLM), RAG, naive RAG, Advanced RAG, Modular RAG, LightRAG

Современные RAG-системы стремительно эволюционируют от простой связки «векторный поиск + большие языковые модели (LLM)» к сложным многоуровневым системам, способным к рассуждению, адаптации и работе с различными типами данных. Так, авторами в работе [1] исследуются вопросы путей создания языковых моделей со встроенным механизмом сознания в предметной области. Предлагается, наряду с вербальной памятью, введение дополнительной когнитивной памяти с доменным администрированием для обеспечения непрерывности обучения.

Эволюция RAG-систем обусловлена рядом факторов: необходимость увеличения точности поиска релевантной информации, оптимизация вычислительных ресурсов и повышение адаптивности систем к различным предметным областям. Еще одна критическая проблема – новые слова, которых не было в обучающих данных векторной модели. Может показаться, что новых слов в языке не так много, но это заблуждение. В английском языке новое слово появляется примерно каждые 98 минут. В научном домене ситуация еще драматичнее: каждую неделю появляются новые названия лекарств,

генов, заболеваний, ИИ-моделей и техник. Все это остается за бортом векторной модели, если ее не дообучать [2].

Различные архитектуры RAG отличаются по способу интеграции и реализации модулей, по выбору алгоритмов и методов извлечения информации. В фундаментальной работе [3] предложено выделить три этапа в развитии технологий RAG:

– Naive RAG («Наивный» RAG). Классический пайплайн «Индексация – Поиск – Генерация». Документы нарезаются на чанки (фрагменты), индексируются через эмбеддинги (многомерные векторы вещественных чисел фиксированной размерности, которые отображают семантическое значение текста в векторном пространстве), а по запросу ищутся семантически близкие фрагменты, которые подаются в LLM. Основной недостаток «наивного» RAG – фрагментация контекста и низкая точность при сложных запросах.
– Advanced RAG (Продвинутый RAG) фокусируется на улучшении качества индексации и поиска до и после основного запроса. Внедряются такие техники, как оптимизация чанков (chunking), добавление метаданных, использование «переписывателей» запросов (query rewriting) и пост-процессинг результатов (re-ranking) для повышения релевантности.
– Modular RAG (Модульный RAG) представляет собой гибкую платформу, где различные модули (поиск, память, рассуждение, адаптация) могут комбинироваться и настраиваться под конкретную задачу. Это позволяет заменять отдельные компоненты и расширять функциональность, например, подключая инструменты для тонкой настройки (fine-tuning).

В современных передовых архитектурах RAG исследования направлены на глубину понимания контекста и сложные рассуждения. Можно выделить пять основных направлений развития. Сравнительная характеристика архитектур приведена в таблице 1.

1. Графовые RAG (GraphRAG) [4].

Вместо поиска по изолированным фрагментам текста, GraphRAG строит граф знаний, где узлы – это сущности или целые документы, а ребра – связи между ними. Из документов извлекаются сущности и отношения (часто с помощью LLM), формируя структурированный граф. Поиск выполняется путем обхода графа, что позволяет находить связанную информацию из разных источников.

Преимущества. Идеален для многосложных (multi-hop) вопросов, требующих соединения фактов из разных документов (например, «Как реше-

ние X повлияло на компанию Y в 2025 году?»). Подходы вроде Microsoft GraphRAG используют иерархическую кластеризацию для ответов на глобальные вопросы по всему корпусу текстов.

Примеры: Fast GraphRAG, LightRAG, MiniRAG.

2. Агентные RAG (Agentic RAG) [5].

Система перестает быть пассивным конвейером и превращается в активного агента, который сам планирует свои действия. Агент анализирует запрос, решает, какие инструменты использовать (векторная БД, поиск в интернете, API, SQL-базы), формулирует подзапросы и итеративно уточняет результаты.

Преимущества. Адаптивность и способность решать сложные, составные задачи, где нужна не просто выдача фактов, а цепочка рассуждений и обращений к разным источникам.

3. Саморефлексирующие и корректирующие RAG (Self-RAG / Corrective-RAG) [6].

Архитектуры, которые критически оценивают качество собственных результатов. Встраивается цикл самопроверки. Например, Corrective-RAG (CRAG) использует легковесный оценщик для проверки релевантности найденных документов и, при низкой оценке, инициирует повторный поиск или обращается к вебу. Self-RAG учит модель генерировать специальные «токены размышления» для контроля качества на этапе инференса.

Преимущества. Повышает надежность и точность ответов, особенно при работе с «зашумленными» или неполными базами знаний.

4. Иерархические и древовидные (RAPTOR) [5].

Решают проблему потери глобального контекста при дроблении текста на мелкие куски. Метод RAPTOR (Recursive Abstractive Processing for Tree-Organized Retrieval) рекурсивно кластеризует и суммирует фрагменты текста, создавая многоуровневое дерево. Листья – это исходные чанки, а родительские узлы – их краткие изложения. Поиск может идти по всем уровням одновременно или целенаправленно.

Преимущества. Позволяет находить информацию как на детальном, так и на высокоуровневом, обобщенном уровне, что важно для понимания больших документов.

5. Безэмбеддинговые и гибридные подходы [6].

Направление, возникшее как реакция на высокую стоимость и сложность инфраструктуры векторных баз данных. Рассмотрим это направление

более подробно, так как многие исследователи действительно ограничены в ресурсах.

Основная идея здесь – отказ от универсального семантического поиска как единственного метода извлечения информации и использование более контролируемых, точных или экономичных стратегий.

5.1. Самый распространенный и прагматичный подход – это *лексический поиск*. Он не отказывается от эмбеддингов полностью, а дополняет их классическим полнотекстовым поиском, например BM25 (Best Match 25 – широко используемый алгоритм полнотекстового поиска).

Таким образом, семантический поиск (Dense) для эмбеддингов запроса и документов для поиска по смыслу, а лексический поиск (Sparse) для алгоритмов вроде BM25, который ищет по точному совпадению ключевых слов. Затем результаты обоих методов объединяются и переранжируются с помощью специальных алгоритмов, например, Reciprocal Rank Fusion (RRF). Исследования показывают, что точность при этом ненамного уступает эмбеддингам при значительно меньших накладных расходах.

Пример. Представим, что сотрудник ищет в базе знаний компании документ по коду «Договор-123/24». Чисто семантический поиск может не понять важность точного совпадения цифр и символов и вернуть все договоры вообще. Гибридный подход с использованием BM25 гарантирует, что документ с точным совпадением кода попадет в топ результатов, даже если семантическая модель сочтет его менее релевантным, чем другие.

5.2. LLM-управляемый поиск. Здесь большая языковая модель сама становится «движком» поиска, используя свои способности к рассуждению и планированию. LLM анализирует запрос пользователя и список всех доступных документов (или их оглавлений) и выбирает 1-3 самых вероятных кандидата. Затем модель открывает выбранные документы и изучает их содержание, часто разбивая процесс на несколько шагов для уточнения результата. Например, фреймворк ELITE (Embedding-Less Retrieval with Iterative Text Exploration) реализует итеративный цикл: LLM выдвигает гипотезу о том, где может быть ответ, проверяет фрагмент текста и на основе этого решает, нужно ли «копать» глубже.

Пример. Проект Vectorless PDF Chatbot на GitHub. Пользователь загружает до 100 PDF-файлов. Когда задается вопрос, LLM сначала выбирает, какой из 100 файлов наиболее релевантен, а затем изучает содержимое только его страниц, чтобы сформулировать ответ. Это полностью исключает этап предварительной индексации и создания эмбеддингов [7].

5.3. Промпт-управляемый поиск (Prompt-RAG) – экспериментальный подход, основанный на использовании структуры документа. Модели предлагается структурированное оглавление, и она сама выбирает, какие разделы нужно открыть [4].

Таким образом, вместо векторов создается структурированное оглавление всего корпуса документов. По запросу пользователя LLM анализирует это оглавление и выбирает, какие разделы (главы, параграфы) с наибольшей вероятностью содержат ответ. Затем содержимое только этих разделов извлекается и подается в модель для генерации финального ответа.

Пример. Исследователи из Южной Кореи применили этот метод в узкоспециализированной области – традиционной корейской медицине. Они обнаружили, что стандартные эмбеддинги плохо справлялись со специфической терминологией. Prompt-RAG, основанный на структурированном знании, показал значительное улучшение релевантности и информативности ответов по сравнению с классическим RAG.

5.4. Структурно-файловый подход (Agent-First, File System based).

Этот подход, реализованный в проекте EFKA (Embed-Free Knowledge Agent), предлагает радикально иную философию: файловая система как база данных, а LLM – как интеллектуальный проводник по ней [3].

При этом отсутствует индексация, а документы просто лежат в папках. При запросе агент (LLM) начинает навигацию: смотрит структуру папок, читает автоматически сгенерированные файлы README.md с кратким содержанием каждой директории. Основываясь на этом, агент решает, в какой файл «заглянуть». Он может прочитать небольшой файл целиком или, если файл большой, сначала изучить его внутреннее оглавление, чтобы прочитать только нужный раздел.

Пример. EFKA создан для корпоративных баз знаний, где целостность информации критична. Если в документе «Политика возврата» сначала идут общие правила, а в конце – важное исключение для крупных клиентов, традиционный RAG, вырвав кусок из середины, может упустить это исключение. Агент EFKA прочитает документ от начала до конца (или целенаправленно дойдет до нужного раздела) и предоставит полный, контекстно-верный ответ.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение передовых архитектур RAG

Техника	Ключевое отличие	Когда использовать	«Узкие места»
GraphRAG	Использует граф знаний для связи сущностей	Сложные запросы, требующие связи фактов из разных документов (multi-hop)	Высокая стоимость построения и обновления графа
AgenticRAG	Агент сам планирует шаги и выбирает инструменты	Задачи, требующие обращений к разным источникам (БД, API, веб)	Рост задержки (latency), сложность отладки и контроля агента
Self-RAG/ CRAG	Встроенный цикл самопроверки и коррекции	Работа с «зашумленными» данными, где качество поиска нестабильно	Дополнительные вычислительные затраты на оценку и повторный поиск
RAPTOR	Многоуровневое суммаризированное дерево контекста	Анализ длинных и структурированных документов (книги, отчеты)	Ресурсоемкость построения и обновления дерева
Гибридные подходы	Потоковый (token-level) поиск или поиск по гипотетическому ответу	Задачи, критичные к точности формулировок (юриспруденция, код, медицина)	Увеличение размера индекса и времени на оценку (scoring)

Итак, развитие RAG в настоящее время годах определяется следующими трендами:

– От поиска к рассуждению. Архитектуры смещаются от простого ретрива к сложным механизмам рассуждения, интегрируя планирование и многоагентное взаимодействие.
– Мультимодальность. Активно развиваются модели, способные одновременно работать с текстом, изображениями, аудио и структурированными данными (Multimodal RAG).
– Адаптивность и эффективность. Растет интерес к гибридным подходам, которые могут переключаться между разными стратегиями поиска в зависимости от задачи, чтобы оптимизировать баланс между точностью и скоростью, а также снижать стоимость инфраструктуры.
– Ориентация на структурированные данные. Современные RAG-системы все активнее используют структурированные метаданные для точного понимания сущностей, а не просто неструктурированного текста.

Таким образом, современный ландшафт RAG архитектур представляет собой не единый стандарт, а спектр решений – от экономичных безэмбеддинговых систем до мощных, но ресурсоемких графовых и агентных платформ, выбор которых диктуется конкретной задачей и доступными ресурсами.

Список используемых источников

1. Литвинов В. Л., Злобин О. Н., Филиппов Ф. В. Предметно-ориентированные языковые модели непрерывного обучения. В сборнике: VI Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT'2025). Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2025. С. 16-18.

2. Garbage In, Garbage Out: как мы учили ИИ искать не в веб-помойке, а в библиотеке. И чему мы научились сами. URL: https://habr.com/ru/articles/953636/ (Дата обращения: 26.02.2026).

3. Abo El-Enen, M., Saad, S. & Nazmy, T. A survey on retrieval-augmentation generation (RAG) models for healthcare applications. Neural Comput & Applic 37, 28191–28267 (2025). https://doi.org/10.1007/s00521-025-11666-9. (Дата обращения: 26.02.2026).

4. Сравнение графовых RAG в чат-ботах. URL: https://github.com/da-the-dev/habr-article. (Дата обращения: 26.02.2026).

5. Beyond Vector Search: 5 Next-Gen RAG Retrieval Strategies. URL: https://machinelearningmastery.com/beyond-vector-search-5-next-gen-rag-retrieval-strategies/. (Дата обращения: 26.02.2026).

6. Beyond Vector Databases: RAG Architectures Without Embeddings. URL: https://www.digitalocean.com/community/tutorials/beyond-vector-databases-rag-without-embeddings. (Дата обращения: 26.02.2026).

7. A Systematic Review of Key Retrieval-Augmented Generation (RAG) Systems: Progress, Gaps, and Future Directions. URL: https://arxiv.org/abs/2507.18910. Дата обращения: 26.02.2026).

A STUDY OF MODERN RAG-SYSTEM ARCHITECTURES

Gubin A., Litvinov V., Filippov F.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

RAG (Retrieval-Augmented Generation) is a hybrid approach combining generative language models and mechanisms for extracting relevant information from external data sources. The main purpose of such systems is to improve the quality of language model generation by accessing relevant data that may not be contained in the training sample. Due to its ability to combine extensive knowledge of large language models with up-to-date information from external sources, RAG finds wide application in a wide variety of fields, including question-and-answer systems, time series analysis, accuracy improvement in legal research, etc. The paper provides a comparative analysis of advanced RAG architectures.

Key words: Large Language Models (LLM), RAG, Naive RAG, Advanced RAG, Modular RAG, LightRAG

УДК 159.9.072
ГРНТИ 28.23.25

ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ

А. Н. Губин, В. Л. Литвинов, Ф. В. Филиппов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Исследуются модели оценки уровня подготовки студентов по результатам тестирования. Рассматривается модернизация модели для оценки уровня подготовки студентов с учетом сложности тестовых заданий и параметров, определяющих вероятности, как возможности угадывания правильных ответов, так и совершения случайных ошибок, вследствие небрежности испытуемых.

модель Раша, модель Бирнбаума, функция успеха, уровень подготовки

Одной из основных функций управления качеством образования является контроль уровня подготовки обучаемых. Под контролем обычно понимается процесс определения уровня знаний, навыков, умений обучаемого в результате выполнения им устных и письменных заданий [1].

Как показывает опыт, одним из наиболее эффективных способов контроля уровня знаний по определенной теме или за курс обучения является тестирование, которое позволяет за сравнительно короткие промежутки времени оценить результативность процессов обучения.

Совокупность контрольных тестов, как правило, представляет собой систему заданий, анализ результатов выполнения которых, позволяют измерить уровень учебных достижений студентов относительно полного объема знаний, которыми должны овладеть обучающиеся в результате реализации образовательного курса по заданной дисциплине.

Оценка уровня подготовки студентов при тестировании существенно зависит как от качества тестовых заданий, в том числе и от сложности тестов [2], так и от совокупности психофизиологических факторов, влияющих на способности студентов к решению задач контрольных тестов.

Ниже рассматривается решение задачи оценки уровня подготовки студентов, по результатам тестирования с учетом сложности тестовых заданий и параметров, определяющих вероятности как возможности угадывания правильных ответов, так и совершения случайных ошибок, вследствие

небрежности испытуемых при определении правильных ответов на тестовые задания.

Рассматривая вопросы оценки сложности конкретного тестового задания необходимо учитывать форму представления тестового задания [2-4].

В общем случае, сложность тестовой единицы δ_i можно оценить как

$$\delta_i = -N \cdot \sum_{i=1}^{n} p_i(\log p_i),$$

где N – общее количество ответов, предлагаемых в рассматриваемой тестовой единице, n – количество классов понятий, к которым относятся варианты предлагаемых ответов.

При этом вероятность p_i оценивается как отношение

$$p_{\text{i}} = \frac{n_0}{N_i},$$

где n_0 – количество правильных ответов, N_i – количество предлагаемых ответов, относящихся к i-ому классу понятий, используемых в тестовой единице.

Предлагаемая форма оценки сложности тестовых единиц может быть использована практически для всех форм представления тестовых заданий.

Вероятность правильного ответа при тестировании студентов обычно моделируется логистической функцией от разницы значений параметров уровня подготовки тестируемого и сложностью тестовой единицы. Математическая форма модели в данном случае получила наименование модели Раша [3-5] и имеет следующий вид

$$P\{x_j = 1\} = \frac{\mathrm{e}^{\theta_j - \delta_i}}{1 + \mathrm{e}^{\theta_j - \delta_i}},$$

где $P\{x_i = 1\}$ – вероятность правильного ответа (функция успеха) на вопросы тестового задания, θ_j – уровень подготовки j-го студента, δ_i – сложность i-ой тестовой единицы.

Обычно при использовании модели Раша и полученных результатов оценки сложностей отдельных тестовых единиц можно получить выражение для определения обычно латентного значения уровня подготовки j-ого студента при решении i-ого тестового задания, которое имеет следующий вид

$$\theta_j = \ln\left(\frac{P\{x_i = 1\}}{1 - P\{x_i = 1\}}\right) + \delta_{\text{i}}\,.$$

Пример 1. В [2] получено решение задачи оценки сложности теста типа «множественный выбор» с одним правильным ответом, которое определяет $\delta_i = 2{,}11328$. Для данного теста, при реализации функции успеха $P\{x_i = 1\} = 0{,}9$, уровень подготовки испытуемого определяется как

$$\theta_j = \left[\ln\left(\frac{0{,}9}{(1-0{,}9)}\right) + 2{,}11328\right] = 4{,}303.$$

Если функция успеха составляет $P\{x_i = 1\} = 0{,}5$, то оценка уровня подготовки определится как $\theta_j = 2{,}113$.

Оценить динамику изменения оценки уровня подготовки студента можно по графику (рис.1) зависимости θ_{1j} от значений функции успеха $P\{x_i = 1\}$ для i-го тестового задания.

Однако в данном случае не учитывается возможность угадывания испытуемым правильных ответов.

Для оценки уровня подготовки студента с учетом такой возможности используем трехпараметрическую модель Бирнбаума [4]

$$P\{x_j = 1\} = c_j + (1 - c_j)\frac{e^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}{1+e^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}, \quad (1)$$

где c_j – коэффициент, учитывающий вероятность, того, что j-й студент может угадать правильный ответ в i-ом тесте; α_i – коэффициент, определяющий дифференцирующее свойство модели.

Учитывая последние выражения, уровень подготовки испытуемого при решении конкретного тестового задания можно определить как

$$\theta_j = \frac{1}{\alpha_i}\left[\ln\left(\frac{P\{x_i = 1\} - c_j}{1 - P\{x_i = 1\}}\right) + \alpha_i\delta_i\right].$$

Пример 2. Для рассматриваемого теста, при реализации функции успеха $P\{x_i = 1\} = 0{,}9, \alpha_i = 1$ и $c_j = 0{,}1$, уровень подготовки испытуемого определяется как

$$\theta_j = \left[\ln\left(\frac{0{,}9-0{,}1}{(1-0{,}9)}\right) + 2{,}11328\right] = 4{,}192.$$

Если функция успеха составляет $P\{x_i = 1\} = 0{,}5$, то оценка уровня подготовки определится как $\theta_j = 1{,}890$.

Оценить динамику поправок значений оценки уровня подготовки студента можно по рис.1 представлена зависимости θ_j от значений функции успеха $P\{x_i = 1\}$ для i-го тестового задания с учетом θ_{2j} и без учета вероятности угадывания правильного ответа θ_{1j}.

Анализ результатов тестирования показывает, что при выполнении тестовых заданий кроме возможности угадывания правильного ответа, возможны случайные ошибки по небрежности, которые снижают общую оценку. Для учета этого дополнительного фактора при обработке результатов тестирования в рамках современной теории тестов (IRT – Item Response Theory) используют четырехпараметрическую (4PL) [5]. Выражение для которой имеет следующий вид.

$$P\{x_j = 1\} = c_j + (\mathrm{d_j} - c_j)\frac{\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}. \quad (2)$$

Использование данной модели для оценки уровня подготовки студентов приводит к следующему выражению

$$\theta_j = \frac{1}{\alpha_i}\left[\ln\left(\frac{P\{x_i=1\}-\mathrm{c}_j}{d_\mathrm{j}-P\{x_i=1\}}\right) + \alpha_i\delta_i\right],$$

которое не позволяет получить корректного решения поставленной задачи, так как при значениях

$$d_\mathrm{j} = P\{x_i = 1\}$$

значение уровня подготовки студента оказывается неопределенным.

Очевидно, что необходимо модернизировать выражение для четырехпараметрической модели (2) таким образом, чтобы обеспечить возможность корректного решения задачи определения уровня подготовки студентов по результатам тестирования.

Преобразуем выражение (1) к следующему виду

$$P\{x_j = 1\} = \frac{\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}} + \frac{c_j}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}} \quad (3)$$

Для учета вероятности случайные ошибки по небрежности d_j при тестировании студентов добавим в выражение (3) слагаемое

$$\frac{-d_j}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}},$$

тогда окончательное выражение для четырехпараметрической модели в современной теории тестов будет иметь следующий вид

$$P\{x_j = 1\} = \frac{\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}} + \frac{c_j}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}} + \frac{-d_j}{1+\mathrm{e}^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}} \quad (4)$$

или

$$P\{x_j = 1\} = c_j - d_j + (1 - c_j + d_j)\frac{e^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}{1+e^{\alpha_i(\theta_j - \delta_i)}}. \quad (5)$$

Использование выражения (5) для оценки уровня подготовки студентов приводит к следующему выражению

$$\theta_j = \frac{1}{\alpha_i}\left[\ln\left(\frac{P\{x_i=1\}-c_j+d_j}{1-P\{x_i=1\}}\right) + \alpha_i\delta_i\right].$$

Пример 3. Для рассматриваемого теста, при реализации функции успеха $P\{x_i = 1\} = 0{,}9, \alpha_i = 1$, $c_j = 0{,}1$ и $d_j = 0{,}3$, уровень подготовки испытуемого определяется как

$$\theta_j = \left[\ln\left(\frac{0{,}9-0{,}1+0{,}3}{(1-0{,}9)}\right) + 2{,}11328\right] = 4{,}5111.$$

Если функция успеха составляет $P\{x_i = 1\} = 0{,}5$, то оценка уровня подготовки определится как $\theta_j = 2{,}449$.

Оценить динамику поправок значений оценки уровня подготовки студента можно по рис. 1, где представлены зависимости θ_j от значений функции успеха $P\{x_i = 1\}$ для i-го тестового задания с учетом θ_{2j} и без учета вероятности угадывания правильного ответа θ_{1j}, а также θ_{3j} которая учитывает вероятности возможного угадывания и вероятность случайной ошибки студента по небрежности.

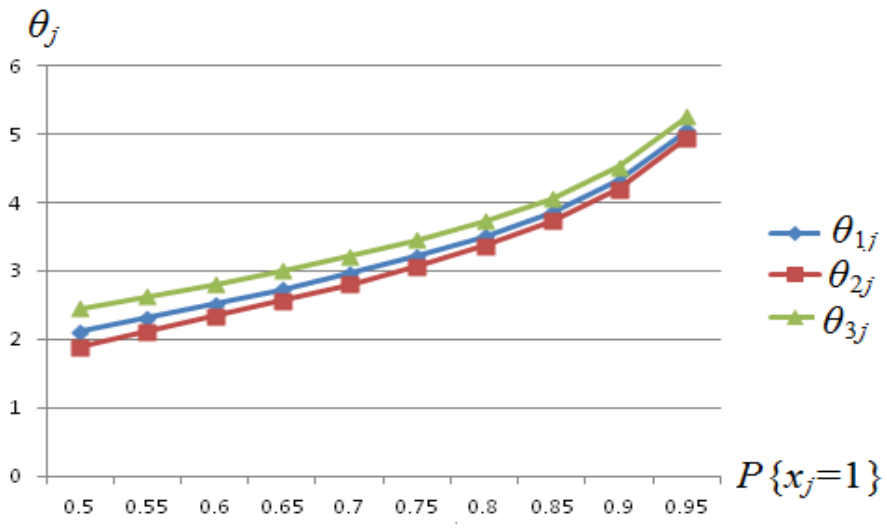


Рис. 1. Уровень подготовки испытуемых: θ_{1j} – без учета вероятности угадывания и вероятности случайной ошибки; θ_{2j} – с учетом вероятности угадывания и без учета вероятности случайной ошибки; θ_{3j} – с учетом вероятности угадывания и вероятности случайной ошибки

Таким образом, предложенная модернизация четырехпараметрической модели в современной теории тестов позволяет решить задачу оценки уровня подготовки испытуемых, основанного на базе динамического вычисления уровня подготовки обучающихся с учетом вероятности угадывания правильного ответа и вероятности совершения случайной ошибки по небрежности, что позволит в дальнейшем совершенствовать стратегию тестирования и получать более адекватные результаты проверки знаний.

Список используемых источников

1. Аванесов В. С. Научные проблемы тестового контроля знаний. М. 1994.

2. Губин А. Н., Литвинов В. Л., Филиппов Ф. В. Методы анализа и оценки сложности тестовых заданий фондов оценочных средств дисциплины // В сборнике: Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем. Сборник докладов Международной конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 149-151.

3. Райт, Б. Д. Решение задач измерения с помощью модели Раша. Журнал педагогических измерений, 1977. 14 (2), 97-116.

4. Нейман Ю. М., Хлебников В. А. Введение в теорию моделирования и параметризации педагогических тестов. М.: Прометей, 2000.

5. Кудж С. А., Цветков В. Я.. Факторы когнитивной сложности. // Иформационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 6. С. 34-41.

ASSESSING STUDENTS' PERFORMANCE BASED ON TEST RESULTS USING A FOUR-PARAMETER ASSESSMENT MODEL ASSESSMENT SYSTEM

Gubin A., Litvinov V., Filippov F.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Models for assessing student preparation based on test results are explored. A refinement of the model for assessing student preparation is considered, taking into account the difficulty of test items and parameters determining the probabilities of both guessing the correct answers and making random errors due to test taker carelessness.

Key words: Rasch model, Birnbaum model, success function, preparation level

УДК 37.022
ГРНТИ 14.35.09

О ПРОБЛЕМАХ ПРЕПОДАВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ СТУДЕНТАМ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

Е. В. Гунина[1], В. В. Орлов[2]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
[2]Военная академия связи им. С. М. Буденного

Перед современной высшей школой остро стоит вопрос об адаптации методик преподавания студентам с практически нулевым уровнем подготовки дисциплины «Инженерная и компьютерная графика», требующей решения задач, как с использованием чертежных инструментов, так и с применением компьютерных технологий. В статье рассматриваются основные проблемы, возникающие в процессе выполнения студентами технического чертежа, и предлагаются способы адаптации их деятельности для решения новых графических задач в максимально короткие сроки.

проблемы адаптации, дифференцированный подход, традиционные инструменты, компьютерные программы

Проблема адаптации студентов с низким уровнем начальной подготовки к дисциплине «Инженерная и компьютерная графика» действительно актуальна для современных вузов. Основной проблемой в изучении дисциплины является нехватка базовых знаний у студентов, а иногда и полное их отсутствие. Многие студенты приходят в вуз с минимальным уровнем знаний по инженерной графике, что затрудняет понимание сложных геометрических построений и использование профессиональных стандартов.

Следующей причиной слабого освоения знаний по предмету является недостаточный умения работы традиционными чертежными инструментами. В средней школе, как правило, учащиеся, если изучают предмет «Черчение» получают опыт работы с чертежными инструментами, это помогает им быстрее осваивать дисциплину «Инженерная и компьютерная графика», выполнять задания, как в тетради, так и на формате более уверенно, соблюдая основные требования к толщине и качеству линий.

Конечно, сегодня выполнение задания чертежными инструментами начинают заменять работой на компьютере в специализированных программах, в первую очередь это Компас-3D и многие студенты достаточно быстро осваивают данную программу. Практика показывает, что у обучающихся больший интерес вызывает работа с компьютером, чем с карандашом и линейкой. Даже

обучающиеся слабого уровня на занятиях по компьютерной графике работают с большим интересом. Это связано с тем, что они имеют возможность видеть готовый результат своей работы (3D-модель), а также рассмотреть ее с разных сторон [1]. Однако, отсутствие базовых знаний по инженерной графике и понимания основ метода прямоугольного проецирование, которое лежит в основе создания чертежей не позволяет студентам осознанно а, следовательно, грамотно построить ассоциативный чертеж.

Следует назвать еще одну причину проблем освоения дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» – сложность предмета и необходимость изучения большого объема материала в кратчайшие сроки при наличии небольшого количества практических занятий. Студент, получая теоретические знания по той или иной теме, не успевает достаточно хорошо освоить практические навыки выполнения задания, что приводит к снижению интереса и стремления учиться. Ряд авторов в своих статьях особенно указывают, что сокращение аудиторных часов привело к критическому сокращению объема информации по дисциплинам графического цикла (начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики) [2].

Перечисленные причины позволяют сделать вывод, что для успешного освоения данной дисциплины требуется помочь студентам к быстрому освоению теоретического материала и умения применить данные знания на практике в кратчайшие сроки. Для решения данного вопроса следует предложить некоторые методические материалы и возможности работы с традиционными инструментами и компьютерными программами.

Обязательным условием для быстрой адаптации студентов к новым особенностям обучения и освоения дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» является необходимость формировать такие качества личности, как готовность к учению, способность учиться самостоятельно, контролировать и оценивать себя. Адаптация к учебной деятельности обеспечивается системой педагогических воздействий, способствующих формированию у студентов навыков и умений учиться [3]. В этом случае является важным оказание психологической и методической помощи студентам, испытывающим трудности в освоении дисциплины.

Возможное проведение тестирования перед началом курса позволит выявить уровень подготовки каждого студента и адаптировать программу индивидуально. Разница в подготовке к данной дисциплине, а также способности самого студента к освоению графических задач требует дифференцированный подход к подбору заданий. В этом случае, для выполнения за-

дания на определенную тему следует выбирать упражнения с различным уровнем сложность. В качестве примера можно представить задание, где по двум проекциям студенту необходимо построить аксонометрическую проекцию. Задание может варьироваться по степени сложности в зависимости от конструктивных особенностей детали. На рисунке 1 представлен чертеж двух видов детали главный вид и вид слева. По заданному чертежу следует построить аксонометрическую проекцию. Форма детали достаточно простая и не имеет наклонных линий, что упрощает задачу исполнения. Такое задание обычно дается студентам плохо представляющие деталь и следовательно, имеют затруднение в исполнении.

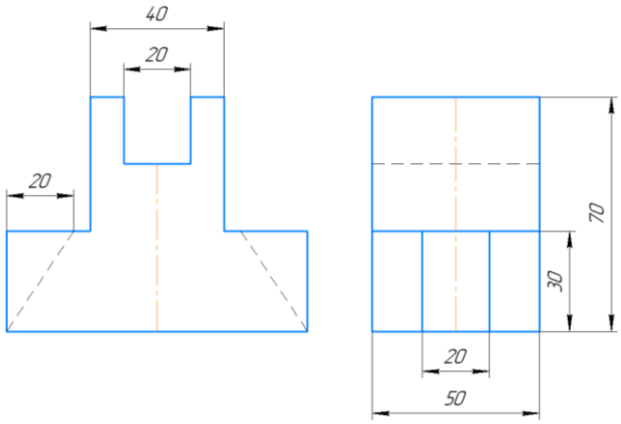


Рис. 1. Задание на построение аксонометрии по двум видам. Вариант 1

Чертеж второго варианта (рис. 2) более сложный, имеет наклонные плоскости и вырезы. Такая деталь требует большего опыта в построении и развитое пространственное мышление. Конечно, такое задание лучше дать студенту, имеющему некоторый опыт и знания в области инженерной графики.

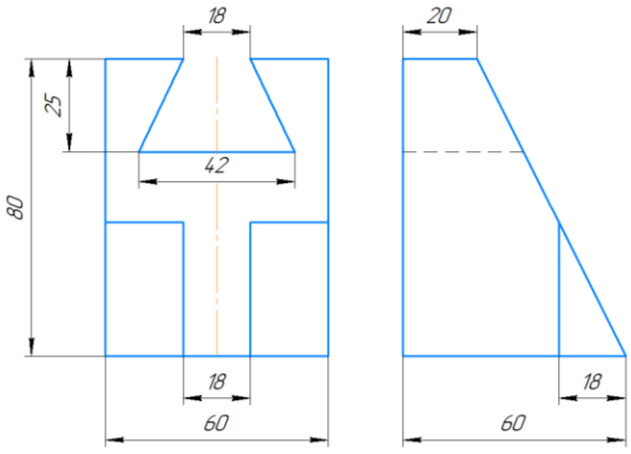


Рис. 2. Задание на построение аксонометрии по двум видам. Вариант 2

Введение компьютерной графики, 3D-моделирования способствует лучшему пониманию объектов в пространстве, повышению интереса к обучению и, тем самым, появлению мотивации в решении пространственных задач [4]. Возможно использование различных логических задач и проведения специальных тренингов по развитию пространственного воображения и творческих способностей.

Современный уровень научно-технического прогресса и широкое применение автоматизированных систем проектирования не позволяют полностью вернуться на обучение «ручной инженерной графике», но ввести в учебную дисциплину задания, выполняемые «вручную», возможно [5].

Несомненно, важным является включать больше практических заданий, связанных с реальными проектами и инженерными задачами. Для этого следует организовывать мастер-классы с участием опытных инженеров и дизайнеров. Это позволит увидеть практическую значимость дисциплины, возможности использования полученных знаний на практике. Конечно, немало важным является применение интерактивных учебных пособий и виртуальных лабораторий, которые способствуют лучшему усвоению материала.

Таким образом, комплексный подход, объединяющий индивидуализацию обучения, современные технологии и психологическую поддержку, позволит повысить эффективность преподавания и успешность освоения инженерных и компьютерных графических дисциплин студентами с различным уровнем подготовки.

Список используемых источников

1. Зитляеев Р. Э., Куркчи Э. У., Абибулаева Н. С. Особенности и сложности преподавание дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» в вузах» // Современное педагогическое образование. 2024. №1 С.107-110 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-i-slozhnosti-prepodavanie-distsipliny-inzhenernaya-i-kompyuternaya-grafika-v-vuzah?ysclid=mm1xbaryzv440361899 (дата обращения: 15.02.2026).

2. Кострюков А. В., Семагина Ю. В. Геометро-графический язык как основа организации учебного процесса при формировании графической культуры студента вуза // Научно методический электронный журнал «Концепт». 2018. № 5 (май). С. 309–320. URL: http://e-koncept.ru/2018/181027.htm. (дата обращения: 22.02.2026).

3. Митина Т. В. К вопросу адаптации студентов младших курсов к условиям обучения в строительном вузе // «ИННОВАЦИИ И ИНВЕСТИЦИИ». 2019. № 2. С.159-161 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-adaptatsii-studentov-mladshih-kursov-k-usloviyam-obucheniya-v-stroitelnom-vuze?ysclid=mm1ydsq81588830618 (дата обращения: 11.02.2026).

4. Маркова В. В., Ямаева С. О., Газизуллина З. А. Влияние предмета черчение в школе на успеваемость в вузе// Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Се-

рия экономика. 2024. № 2 (48). С. 117-123 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-predmeta-cherchenie-v-shkole-na-uspevaemost-v-vuze?ysclid=mm202hxwmd331257484 (дата обращения: 12.02.2026).

5. Болбат О. Б., Шабалина Н. К. Проблемы высшего технического образования в области дисциплин графического цикла //Проблемы современного педагогического образования. 2018. № 2 С. 87-90 // URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-vysshego-tehnicheskogo-obrazovaniya-v-oblasti-distsiplin-graficheskogo-tsikla?ysclid=mm1zslslmf380385829 (дата обращения: 22.02.2026).

ON THE CHALLENGES OF TEACHING ENGINEERING AND COMPUTER GRAPHICS TO STUDENTS WITH LOW PREVIOUS EXPERIENCE

Gunina E.[1], Orlov V.[2]
[1]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
[2]Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

The modern higher education institution is faced with the urgent task of adapting teaching methods for students with almost zero level of training in the discipline of «Engineering and Computer Graphics», which requires solving problems both using drawing tools and applying computer technologies.

The article discusses the main problems that arise in the process of students' technical drawing and suggests ways to adapt their activities to solve new graphic problems in the shortest possible time.

Key words: adaptation problems, differentiated approach, traditional tools, computer programs

УДК 004.05
ГРНТИ 81.81.00 : 81.09.21

ИНТЕГРАЦИЯ QA И QC В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ РАЗРАБОТЧИКОВ ПО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КУЛЬТУРЫ КАЧЕСТВА В УЧЕБНЫХ ПРОЕКТАХ

Ю. В. Денисова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В условиях растущих требований индустрии к качеству программного обеспечения вузовская подготовка будущих разработчиков часто ограничивается поверхностным знакомством с тестированием, игнорируя системный подход к управлению качеством. В статье рассматривается проблема размывания границ между контролем качества и обеспечением качества в учебных проектах, что приводит к формированию у студентов фрагментарных представлений о процессах обеспечения качества ПО. Цель исследования – разработка интегрированной образовательной модели, сочетающей процессно-ориентированный подход QA (стандартизация, метрики, аудит) и продукто-ориентированный подход QC (тестирование, верификация). Предложенная модель позволяет трансформировать контроль качества из формальной процедуры в элемент учебной культуры разработки, повышая готовность выпускников к требованиям современного рынка труда.

обеспечение качества, контроль качества, тестирование программного обеспечения, образовательная среда вуза, учебные проекты, методология контроля качества, автоматизация тестирования, стандарты качества ПО, QA, QC

С увеличением количества ПО неизменно растет и уровень требований к его качеству. Однако если опытные программисты как правило уже учитывают эти требования, то в случае выпускников ВУЗов обнаруживается недостаточная подготовка в этом направлении. Отсутствие системного подхода к обучению контроля разработки приводит к размыванию границ между QA (Quality Assurance) и QC (Quality Control), что, в свою очередь, влечет к увеличению дефектности ПО.

Для решения этой проблемы предлагается интегрировать промышленные практики контроля и обеспечения качества разработки в образовательный процесс с адаптацией под учебные цели. Однако сначала стоит обосновать различия QA/QC, чтобы не допустить подмены понятий, так как в данном случае контаминация также может повлиять на понимание различий и применений в процессе разработки ПО.

Первым толчком для появления расхождения понятий стал переход от тестирования как способа проверки к культуре обеспечения качества ПО в целом. Стали применяться стандарты и модели, например ISO/IEC 25010 – определяющий модель качества продукта, и CMMI (Capability Maturity Model Integration) – международная модель зрелости процессов, которая помогает перейти от нижнего уровня (хаоса) к оптимизирующему (постоянное улучшение). Впоследствии проявилась и дихотомия обеспечения и контроля качества, на которой стоит задержаться.

Quality Control (QC) – это ***контроль*** качества. Он предполагает выявление дефектов ПО в уже готовом продукте перед его выпуском, а также проверку соответствия требованиям. Важно подчеркнуть, что он применяется уже на этапе тестирования и после разработки, т.е. его можно условно представить как «точку» в конце разработки. Основной фокус QC на самом продукте.

Quality Assurance (QA) – это ***обеспечение*** качества. В отличии от QC, оно направлено на профилактику дефектов и предотвращение появления ошибок, а также на улучшение процессов разработки. Оно применяется не в конце, а на протяжении всего жизненного цикла разработки, начиная с анализа требований. Основной фокус – на процессах разработки ПО. Очень условно можно представить различие QA и QC на рисунке 1, где QA – это непрерывный процесс, включающие тестирование на каждом этапе, а QC – это завершающий этап разработки, и в том числе окончательное тестирование на соответствие заданным требованиям и качеству в целом.

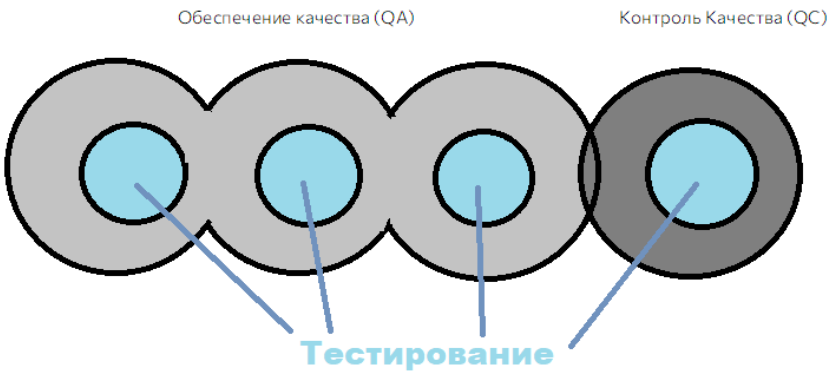


Рис. 1. Условное сравнение QA и QC

Таким образом, можно сказать, что QC использует реактивный подход (после возникновения неполадок), а QA – проактивный (прогнозирование неполадок).

Адаптируя эти подходы к специфике обучения в ВУЗе, можно сказать, что QA сосредоточится, к примеру, на шаблонах документации, code review checklist (чек-лист проверки кода), а QC – может раскрыть ручное тестирование или unit-тесты.

Теперь, понимая различие понятий, можно перейти к синергии двух подходов, создав модель «предотвращение + обнаружение» как основу для учебной дисциплины. Объектом исследования выступает образовательный процесс подготовки разработчиков ПО в ВУЗе, а предметом исследования – процессы интеграции QA и QC в учебные проекты.

QA формирует у студентов мышление «как предотвратить ошибки», а QC формирует навыки «как найти их и исправить». Так, интеграция обоих подходов может создать устойчивую привычку учитывать контроль качества на всех этапах, не только на завершающем.

Модель с использованием обоих подходов может выглядеть как на рисунке 2.

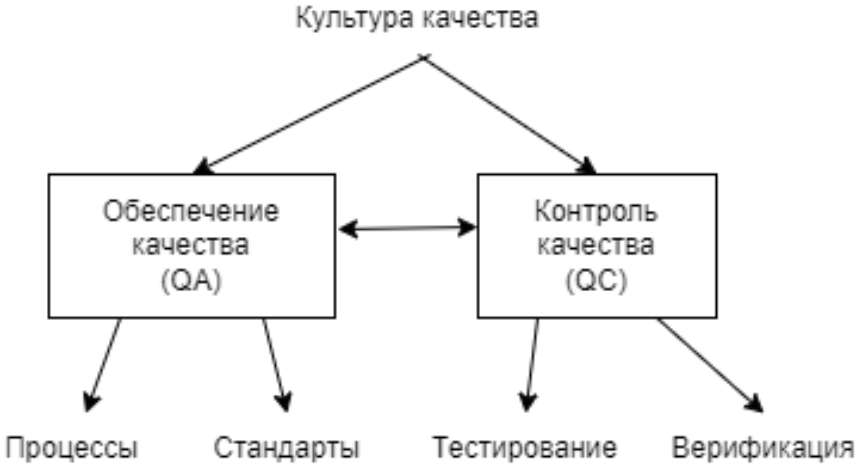


Рис. 2. Модель обеспечения культуры качества

Стоит заметить, что QA тоже предполагает тестирование на каждом этапе, но для того, чтобы не смешивать понятия, в общей модели это на данный момент опущено, но будет учитываться при более подробном рассмотрении модели

Таким образом, стоит выделить следующие принципы, на которых основана модель:

– принцип непрерывности;
– принцип синхронизации;
– принцип измеримости;
– принцип рефлексии.

Принцип непрерывности предполагает контроль качества на всех этапах учебного проекта. Принцип синхронизации означает параллельное развитие процессных (QA) и продуктовых (QC) компетенций. Принцип измеримости учитывает использование метрик для объективной оценки качества. В завершении, принцип рефлексии означает регулярный анализ ошибок и улучшение процессов.

Теперь можно представить курс как жизненный цикл учебного проекта с интегрированным контролем качества. Каждый этап проекта будет включать в себя элементы QA и QC, а также интегрированный результат.

Этап 1. Планирование. На этом этапе со стороны QA будет выполняться определение критериев качества, создание чек-листов. Со стороны QC – разработка стратегии тестирования. В итоге будет создан план качества проекта.

Этап 2. Дизайн. В данном случае дизайн означает процесс проектирования структуры ПО перед написанием кода. Со стороны QA будет затронуты ревью архитектуры и стандарты проектирования, а со сторон QC – тест-дизайн, создание тест-кейсов. При интеграции обоих подходов будет создана валидированная архитектура, которая гарантирует, что компоненты ПО работают корректно, а принятые проектные решения функциональны и отвечают стандартам качества.

Этап 3. Реализация. В плане QA можно рассмотреть code review (процесс анализа кода другими разработчиками, например, коллегами, до того, как эта часть кода будет объединена с остальной частью, т.е. механизм Pull Request), а также статический анализ кода. QC, в свою очередь, на этом этапе рассмотрит, например, unit-тестирование и интеграционное тестирование. Таким образом уже на этом этапе будет получен код с покрытием тестами больше, чем на 70%.

Этап 4. Тестирование. На этом этапе тестирование будет рассмотрено более внимательно и так же с двух сторон. Со стороны QA это аудит процесса тестирования, а со стороны QC – системное и приёмочное тестирование. В итоге получится отчет о качестве продукта.

Этап 5. На последнем этапе будет выполняться сдача продукта. В свете QA будет учитываться анализ метрик процесса и полученные сведения, а QC сосредоточится на анализе дефектов, составлении отчетности. Вместе на выходе студентам будет привит навык постоянного улучшения и рефлексии.

В итоге предложенная модель демонстрирует значимое снижение дефектности учебных проектов, рост метрик качества, повышение культуры качества разработки ПО.

Таким образом, такой подход может сократить разрыв между академической подготовкой выпускников и требованиями индустрии к качеству ПО, а также снизить преобладание так называемого «кодоцентричного» подхода в обучении студентов и игнорировании процессов обеспечения и контроля качества.

На основе материалов, предложенных в статье, предполагается создание учебной дисциплины в рамках направления подготовки 09.03.02 – информационные системы и технологии, и 09.03.04 – программная инженерия. Новизна обусловлена созданием концептуальной модели формирования культуры качества через синтез процессно-ориентированного (QA) и продукто-ориентированного (QC) подходов.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. М.: Изд-во стандартов, 2015. 36 с.

2. ISTQB Foundation Level Syllabus 4.0., 2023. 60 с.

INTEGRATION OF QA AND QC INTO THE EDUCATIONAL PROCESS OF TRAINING SOFTWARE DEVELOPERS TO IMPROVE THE QUALITY CULTURE IN EDUCATIONAL PROJECTS

Denisova Y.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In the face of growing industry demands for software quality, university training for future developers often limits itself to a superficial familiarity with testing, ignoring a systematic approach to quality management. This article examines the problem of blurring the boundaries between quality control (QC) and quality assurance (QA) in academic projects, leading to students developing fragmented understanding of software quality assurance processes. The goal of the study is to develop and test an integrated educational model combining a process-oriented QA approach (standardization, metrics, audit) and a product-oriented QC approach (testing, verification). The proposed model allows for the transformation of quality control from a formal procedure into an element of the educational development culture, improving graduates' readiness for the demands of the modern labor market.

Key words: quality assurance, quality control, software testing, higher education environment, educational projects, quality control methodology, quality competencies, test automation, software quality standards

УДК 004.4'24
ГРНТИ 50.51, 28.23

МОДЕЛЬ СЕЛЕКТИВНОГО ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Ю. В. Денисова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье предложена модель селективного внедрения искусственного интеллекта в жизненный цикл разработки программного обеспечения (SDLC), направленная на решение проблемы несистемной интеграции ИИ-инструментов. Модель основана на оценке этапов SDLC по критериям потенциальной выгоды, зрелости процессов и уровня рисков, что позволяет определить оптимальные «точки входа» для работы ИИ. Результатом применения модели является увеличение производительности и качества кода.

искусственный интеллект, жизненный цикл ПО (SDLC), селективное внедрение, автоматизация разработки, управление рисками, эффективность разработки, генеративный ИИ, метрики качества кода

Цифровая трансформация индустрии разработки программного обеспечения ставит перед разработчиками новые проблемы и возможности. Одна из таких возможностей – активное развитие искусственного интеллекта и применение его в различных сферах, в том числе в разработке ПО. Например, в исследовании [1] экспериментальная группа, имевшая доступ к инструменту парного программирования на основе ИИ, выполнила задачу на 55,8 % быстрее, чем контрольная группа, не имеющая этого доступа. Однако неконтролируемое использование ИИ ведет к рискам и ошибкам [2].

В целом можно выделить тенденцию смещения от написания кода к вопросам планирования разработки. В таком контексте можно использовать ИИ, адаптируя его под конкретные нужды проекта. В статье рассмотрены эти нужды, описано создание модели селективного (выборочного) внедрения ИИ в жизненный цикл разработки программного обеспечения (SDLC), обоснован выбор именно селективного подхода. При этом стоит учитывать, что может возникнуть противоречие между желанием ускорить процесс разработки и надежностью полученного результата, а также вопрос о целесообразности применения и методологии принятия решений о том, стоит ли внедрять ИИ на каждом этапе.

На данный момент можно выделить несколько направлений ИИ-инструментов для SE (Software Engineering), т.е. для разработки ПО:
– инструменты генерации кода (Code Completion);
– инструменты рефакторинга (т.е. улучшения структуры ПО без изменения его внешнего поведения);
– инструменты объяснения кода;
– инструменты генерации тестов и документации.

Такими инструментами являются, например, GitHub Copilot, Cursor, ChatGPT, Claude. При использовании этих инструментов существенно повышается скорость разработки, при этом проявляется снижение качества кода и безопасности, так как большинство фокусируется на «эффективности» (скорость), игнорируя «целесообразность» (т.е. где именно стоит применять эти инструменты). Это можно увидеть в исследованиях, проведенных с использованием GitHub Copilot [3]. Вдобавок, как правило, отсутствуют стандарты для использования ИИ. Поэтому предлагается модель селективного внедрения ИИ в процесс разработки ПО. Селективного в данном случае означает стратегическое разделение ресурсов ИИ исключительно на те участки SDLC, где выгода максимальна, а риски минимальны, вместо полного отказа от использования ИИ или его повсеместного внедрения.

При этом стоит учесть факторы, которые могут повлиять на выбор модели, например: тип проекта, квалификация команды, юридические ограничения.

Если говорить о типах проекта, то можно выделить Startup, т.е. начальный уровень, Enterprise, т.е. продвинутый уровень, и Safety-critical, т.е. критически важное для безопасности ПО, в котором сбои могут привести к серьезным последствиям.

Квалификация команды также может повлиять на результат. Джуниор (junior) – это разработчик, который только начал карьеру, из-за чего он может часто допускать ошибки и не способен на качественное планирование ввиду недостатка опыта. Мидл (middle) – это опытный разработчик, который уверенно пользуется необходимыми инструментами в работе, способен планировать время, понимает базовые концепции. Сеньор (senior) – это программист с большим опытом, который принимает ключевые решения по разработке продукта, причем он может уже перерасти в категорию тимлида (teamlead), руководителя группы. На этой ступени разработчик способен прогнозировать и снижать технические риски при разработке ПО. Последние два могут эффективно использовать ИИ-инструменты в разработке ПО, минимизируя риски.

К юридическим ограничениям можно отнести, например, правовые нормы, защищающие персональные данные (в соответствии с законом ФЗ-152) и коммерческую тайну.

Перед тем, как предлагать модель внедрения, стоит подробно в свете темы рассмотреть жизненный цикл разработки ПО (SDLC). Этапы можно выделить следующие:

– планирование и анализ требований;
– проектирование (Design);
– разработка (Implementation);
– тестирование (Testing);
– развертывание и эксплуатация (Deployment & Maintenance).

На этапе планирования анализируются ИИ-инструменты, которые можно использовать, составляется backlog, т.е. упорядоченный список всех задач, требований, которые необходимо реализовать в рамках проекта, причем отсортированный по приоритетности, выявляются противоречия в требованиях.

На этапе проектирования создается генерация прототипов, оптимизация архитектурных решений.

На этапе разработки используются такие ИИ-механизмы, как инструменты генерации и автодополнения кода (Copilot, CodeWhisperer), рефакторинга, создания документации.

На этапе тестирования используются ИИ-инструменты для генерации тестовых сценариев и данных, добавляется акцент на выявлении багов, автоматический анализ покрытия кода.

На последнем этапе, включающем развертывание и эксплуатацию, используется прогнозная аналитика, автоматическое исправление инцидентов, а также анализ логов.

На основе этого предлагаемая модель включает в себя следующие принципы:

– принцип целесообразности;
– принцип постепенности;
– принцип человеко-ориентированности;
– принцип измеримости.

Принцип целесообразности предполагает, что внедрение должно решать конкретную, измеримую проблему.

Принцип постепенности предполагает сначала применение пилотной версии на ограниченной задаче, а после, при успешном использовании, выполнение перехода к масштабированию.

Принцип человеко-ориентированности означает, что ИИ-инструменты используются как помощь разработчикам ПО, а не его полная замена.

Принцип измеримости состоит в том, что все решения о целесообразности применения ИИ должны основываться на данных и оценках.

Теперь стоит перейти к структурным компонентам модели:

– модуль аудита задачи;
– модуль выбора инструмента;
– модуль оценки рисков и возможности применения;
– модуль валидации.

Модуль аудита задачи выполняет анализ входных данных (например, тип кода, доступ к данным).

Модуль выбора инструмента предполагает рекомендацию конкретного ИИ-инструмента или, наоборот, запрет на его использование.

Модуль оценки рисков и возможности применения отвечает за расчет группы риска специальной матрицы, предложенной на рисунке 1.

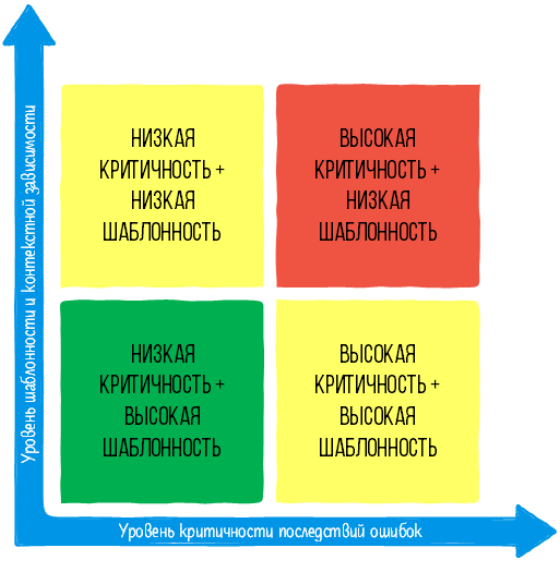


Рис. 1. Матрица оценки рисков и возможности применения

Ось Y показывает уровень шаблонности и контекстной зависимости, т.е. возможность использования ИИ-инструментов для конкретных задач, а ось X – уровень критичности последствий ошибок, т.е. риски использования ИИ-инструментов.

Зеленая зона означает, что ИИ может генерировать код самостоятельно. Обязательный пост-ревью человеком может быть облегчен, но, при этом, все равно не должен быть пропущен. Желтая зона – ИИ может использоваться как дополнение, при это после генерации кода ИИ разработчик должен его обязательно тщательно проверить. Красная зона – часть задач, где использование ИИ для написания кода категорически не рекомендуется из-за высоких рисков и уникальности задач.

И последний, модуль валидации вводит обязательные чек-листы для проверки ИИ-генерации разработчиком.

Далее следует рассмотреть критерии селекции, т.е. матрицу принятия решений. Она предполагает оценку каждого этапа/задачи SDLC по следующим шкалам: выгода, зрелость процесса, готовность данных, риски и навыки команды.

Выгода, или, по-другому потенциал автоматизации определяет, насколько рутинна, объемна или сложна задача.

Зрелость процесса определяет, насколько стабилен и стандартизирован ли процесс, а также можно ли четко описать входные/выходные данные.

Готовность данных смотрит, какова доступность качественных данных для обучения и работы ИИ.

Риски учитывают критичность по безопасности, качеству, соответствию стандартам, процедурам компании и внутренним правилам.

Навыки команды учитывает готовность и способность команды разработчиков работать с новым инструментом, их способность к обучаемости.

Оценка эффективности и управление рисками основана на введении следующих метрик: производительность, качество, экономическое обоснование и принятие командой.

Метрики производительности рассматривают скорость выполнения задач и скорость закрытия тикетов (структурированных карточек задач, ошибок или заявок на изменения).

Метрики качество учитывают показатели дефектности (количество багов, их серьезность), покрытие тестами и результаты статического анализа кода.

Экономические метрики производят расчет экономической целесообразности, снижение операционных затрат, стоимость владения ИИ-инструментом (например, подписка). Ориентировочно можно предложить следующий расчет: (Экономия времени * Ставка разработчика) – (Стоимость лицензии ИИ + Время на ревью).

Метрики принятия командой показывают удовлетворенность разработчиков, частоту использования инструмента и результаты опросов.

Стоит затронуть также стратегии минимизации рисков, такие, как: использование локальных LLM (т.е. не облачных, а установленных на конкретном оборудовании пользователя), политику «нулевого доверия» к сгенерированному коду без тестов, предполагающую, что код обязательно должен проходить проверку, а также регулярное обучение разработчиков промпт-инжинирингу и особенно – выявлению так называемых галлюцинаций ИИ.

В итоге предложена модель, позволяющая перейти от хаотичного к осмысленному, селективному внедрению ИИ-инструментов в процесс разработки ПО на каждом этапе в SDLC. При этом ключевыми элементами предложенной модели являются: модуль аудита задачи, матрица критериев

для отбора задач, модуль оценки рисков и возможности применения, модуль выбора инструмента, система сбалансированных метрик для оценки результата, модуль валидации, стратегии минимизации рисков и экономическое обоснование. Помимо этого, введены принципы целесообразности, постепенности, человеко-ориентированности и измеримости.

Таким образом, положено начало для разработки модели селективного внедрения искусственного интеллекта в жизненный цикл разработки программного обеспечения и адаптация модели под автономных ИИ-агентов, способных самостоятельно выполнять задачи по разработке.

Список используемых источников

1. Sida Peng, Eirini Kalliamvakou, Peter Cihon, Mert Demirer. The Impact of AI on Developer Productivity: Evidence from GitHub Copilot // Software Engineering. Изд-во Cornell University, 2023. 19 с.

2. Xinyi Hou, Yanjie Zhao, Yue Liu, Zhou Yang, Kailong Wang, Li Li, Xiapu Luo, David Lo, John Grundy, Haoyu Wang. Large Language Models for Software Engineering: A Systematic Literature Review // Software Engineering. Изд-во Cornell University, 2023. Вып. 220. С. 1-79.

3. Hammond Pearce, Baleegh Ahmad, Benjamin Tan, Brendan Dolan-Gavitt, Ramesh Karri. Asleep at the Keyboard? Assessing the Security of GitHub Copilot's Code Contributions. // Cryptography and Security. Изд-во Cornell University, 2025. Вып. 68,2. С. 96-105

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры СОД СПбГУТ, кандидатом технических наук, Ю. М. Бородянским.

A MODEL FOR SELECTIVE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE SOFTWARE DEVELOPMENT LIFE CYCLE

Denisova Y.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article proposes a model for the selective implementation of artificial intelligence in the software development lifecycle (SDLC), aimed at addressing the problem of ad hoc integration of AI tools. The model is based on assessing SDLC stages based on potential benefits, process maturity, and risk levels, allowing for the identification of optimal entry points for AI implementation. The model's application results in increased productivity and code quality.

Key words: artificial intelligence, software development life cycle (SDLC), selective deployment, development automation, risk management, development efficiency, generative AI, code quality metrics

УДК 004
ГРНТИ 20.53.00

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ITIL 4 ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИТ-ПОДДЕРЖКИ В ВУЗЕ

Ю. В. Денисова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящее время ИТ-отделы в ВУЗах сталкиваются с большим увеличением задач в связи с цифровизацией высшего образования. Например, появление личного кабинета, дистанционного образования, оцифровка большого количества информации и процессов. В таких случаях в служба поддержки не всегда справляется, из-за чего наблюдается низкая удовлетворенность пользователей, большое количество ошибок, технических неисправностей и так далее. В статье рассматривается применение концепции ITIL 4 для оптимизации ИТ-поддержки в университетской среде. Для начала рассмотрена типичная ситуация на примере конкретного ВУЗа, выявлены основные проблемы в работе, например, разрозненные каналы связи и поступления обращений, отсутствие единой системы учета инцидентов, нечеткие сервисные уровни. Для решения этой проблемы предлагается использовать концепции ITIL 4: предложены практические варианты для улучшения ситуации. Исследование демонстрирует, что концепции ITIL 4 могут быть успешно адаптированы к образовательной среде без избыточной бюрократизации, обеспечивая баланс между структурированностью процессов и гибкостью, необходимой для работы в условиях академического цикла.

ITIL 4, ИТ-поддержка, высшее образование, служба поддержки, управление инцидентами, сервисные уровни, цифровая трансформация вуза.

В настоящее время происходит активный рост цифровизации образования, из-за чего стремительно увеличивается нагрузка на ИТ-отделы ВУЗов. Это, в свою очередь, вызывает большое количество задержек как в работе университета, так и в образовательном процессе, понижает качество обучения. Как правило, к таким проблемам относятся:

– отсутствие централизированного канала подачи заявок;
– отсутствие прозрачности в ходе выполнения заявки;
– отсутствие временных рамок решения проблемы, что особенно чувствуется в срочных ситуациях;
– отсутствие базы данных повторяющихся случаев;
– отсутствие единой системы учета инцидентов и запросов;
– нечеткое разделение между инцидентами и запросами;

– отсутствие прогнозирования пиковых нагрузок;
– реактивный подход вместо анализа ситуации;
– большая бюрократическая составляющая процесса решения проблем;
– и так далее.

Это часть основных проблем, с которыми можно столкнуться как со стороны обучающихся, так и со стороны работающих в ВУЗе, будь то студент, административный сотрудник или преподаватель.

В целом работу ИТ-отдела в ВУЗе можно представить как бизнес-процессы по обеспечению бесперебойного функционирования цифровой инфраструктуры университета. К этому списку можно отнести техническую поддержку, например, устранение неполадок с оборудованием в аудиториях, сопровождение учебного процесса посредством поддержки работы личных кабинетов и платформы для организации учебного процесса (ЛМС), административные вопросы, поддержку сайта университета, безопасность, например, организация контрольно-пропускной системы.

Однако ввиду перечисленных выше проблем эти бизнес-процессы часто являются плохо организованными, что влияет на скорость обработки обращений, выявляет загруженность персонала ИТ-поддержки и низкую удовлетворенность студентов, преподавателей и работников ВУЗа.

Для решения этих проблем можно попробовать рассмотреть эти процессы сквозь призму принципов ITIL 4 для составления анализа текущей ситуации.

Для того, чтобы это сделать, необходимо сначала изучить основные концепции этого подхода. ITIL 4 – это набор библиотек, которые рассматривают лучшие практики управления ИТ-услугами [1]. Основная цель – в создании ценности для пользователя через организацию совместной работы. Под этим понимается быстрая адаптация, гибкость процессов к изменениям, нагрузкам, повышение качества выполнения услуг.

ITIL 4 уже четвертая версия, и в отличии от третьей, она сосредоточена именно реалиях цифровой трансформации и быстрого развития технологий, что делает ее удобной для применения в наше время. ITIL 4 есть три основных элемента: услуги, ценность, практики.

Услуга – это способ создания так называемой ценности через вовлечение разных отделов, людей, технологий. При этот получатель услуги не должен вникать в эти процессы, технические и бюрократические детали, он должен просто получить результат, что удобно для системы университета, где имеется большое количество людей из разных областей и разных воз-

растов. Управление услугами по ITIL 4 рассматривается через призму четырех измерений: организации и люди, информация и технологии, партнеры и поставщики, потоки ценности и процессы.

Применяя их к университетской системе, можно получить следующее. К организации и людям можно отнести администрацию ВУЗа, кафедры и деканаты, преподаватели, студенты, системные администраторы, ИТ-отдел. Причем у каждого из них есть свои особенности, например, администрацию ВУЗа интересуют высокие показатели и бюджет, преподаватели нуждаются в быстрой поддержке, например, при возникновении неполадок в работе ЛМС или оборудования в аудитории (и желательно не сильно углубляясь в бюрократию), студенты также требуют скорости, но не всегда понимают тонкость организационных процессов, кафедры и деканаты решают проблемы самостоятельно, из-за чего возникают дублирования проблем и конфликты, ИТ-отделам часто не хватает четкого разграничения ролей, системные администраторы перегружены рутинными запросами вместо реального развития цифровой инфраструктуры.

К информации и технологиям можно отнести такие системы, как личный кабинет и ЛМС, база данных студентов, сеть Wi-Fi и подобное. При этом при пиковой нагрузке, например, во время сессии, ЛМС зачастую перестает работать, в личном кабинете временами появляется некорректная информация (преподаватель, видя, что у него больше нет пар может уйти, однако пары есть, просто он об этом не знает, так как из-за ошибки в его личном кабинете информации о них нет), базы данных сложно интегрируются друг с другом, из-за чего также может возникать дезинформация. Системы учета обращений, как правило, и вовсе организованы посредственно и используются фрагментарно (при обращении в ИТ-отдел проблемы фиксируются ручкой на бумаге и благополучно забываются).

Что касается партнеров и поставщиков – это могут быть провайдеры, поставщики АИС, производители оборудования (ПК, серверов, сетевого оборудования), государственные органы, выполняющие роль регулятора, другие ВУЗы, осуществляющие обмен опытом и частные компании, заинтересованные в обучении студентов под свои нужды (либо работников для повышения квалификации).

Потоки и ценности включают в себя множество элементов, на которых стоит остановиться отдельно. Например, это регистрация студента или нового преподавателя в системах университета (поток ценности можно назвать «новый пользователь»), при этом может возникать множество ошибок при созда-

нии учетной записи, предполагается много ручных операций. Обращение в службу поддержки (поток ценности «решение проблемы») может выявить отсутствие отслеживания выполнения задания, дублирование, задержки и так далее. Подготовка к сессии и сама сессия (поток ценности «организация обучения») – это всплеск активности пользователей системы, пиковые нагрузки, отказы систем. Выпуск студентов и последующая архивация их данных (поток ценности «завершение обучения») – это ручная работа с базами данных, из-за чего возрастает риск ошибок или потери информации. Закупка или внедрение нового ПО/оборудования (поток ценности «развитие инфраструктуры») как правило связаны с долгими согласованиями, отсутствием четких требований, рамок, дедлайнов. Обучение преподавателей (поток ценности «повышение квалификации») создает и вовсе множеством проблем, как организационных, вроде предоставления доступа к материалам, так и бюрократических, не говоря уже о качестве самого обучения.

Возвращаясь к ключевым элементам ITIL 4, стоит затронуть понятие этих самых ценностей. По ITIL 4 – это результат применения какой-либо услуги, в сфере университета для преподавателя, студента или сотрудника университета. Она формируется от самого начала, с появления запроса на какое-либо действие (например, создание учетной записи нового студента) до окончания его выполнения и по возможности получения обратной связи, что дает возможность своевременно выявлять проблемы или потенциально опасные места, повышать качество работы.

Под практиками же в ITIL 4 понимается набор библиотек, или организационных ресурсов, которые направлены на выполнение работ, достижения ценностей. Они охватывают все четыре измерения.

Таким образом, можно рассмотреть бизнес-процессы среды ВУЗа сквозь призму концепций ITIL 4 и проанализировать текущее состояние. Далее следует перейти ко второй части, а именно к применению этих концепций для улучшения работы процессов ИТ-поддержки и адаптации практик ITIL 4 к специфике образовательной среды с учетом ее цикличности (сессии, зачеты, набор студентов) и многоуровневой структуры пользователей.

Для ИТ-поддержки ВУЗа можно выделить следующие практики:

– Service Desk (служба поддержки);
– Incident Management (управление инцидентами);
– Service Request Management (управление запросами);
– Capacity and Performance Management (прогнозирование нагрузки);
– Monitoring and Event Management (мониторинг);

– Problem Management (данные для анализа)
– Relationship Management
– Service Catalogue.

Более подробное рассмотрение этих практик можно разделить на несколько частей.

Часть 1. Создание единой точки входа – Service Desk. Это предполагает введение централизированной службы поддержки (например, портал + телефон + чат-бот, т.е. минимизация количества каналов связи без ущерба удобству) вместо личных обращений и записей на бумажке о проблемах, звонков, сообщениях в личном кабинете и так далее. Уже на этом этапе обращения могут теряться, или, наоборот, дублироваться. При этом с самого начала стоит разделять понятие запросов и инцидентов. Можно добавить интеграцию с порталом самообслуживания для типовых запросов (доступ к ЛМС, сброс пароля).

Часть 2. Практики Incident Management и Service Request Management могут помочь разобраться с проблемой отсутствия метрик времени по решению запросов, невозможностью отследить статус обращения. Эти две практики также четко разделяют инцидент (Incident Management) и запрос (Service Request Management). Инцидент связан с нарушением услуги, например, обращение «не работает проектор в 529/2». Инциденты предполагают срочное решение. Запросы – это стандартная услуга, например «создание учетной записи». В таком случае необходимо автоматизировать обращение, чтобы в последствии такой запрос выполнялся быстрее. Помимо этого, стоит внедрить SLA (Service Level Agreement) с учетом приоритетов – это классификация обращений и присваивание им приоритетов. Например, преподаватель перед зачетом – высокий приоритет и решение за 15 минут; студент в межсессионный период – стандартный приоритет, решение в течение суток. Здесь же стоит отдельно обговорить MTTR (Mean Time To Repair/Recovery/Respond) – метрики, обозначающие время реагирования на сбой системы и время для ее восстановления, а также FCR (First Contact Resolution) – метрика качества работы поддержки, которая показывает процент обращений, решенных при первом обращении, и CSAT (Customer Satisfaction Score) – метрика, показывающая уровень удовлетворенности.

Часть 3. Проблемы пиковых нагрузок, резких всплесков обращений в начале семестра, перед сессией, перед защитой ВКР. Практика Capacity and Performance Management предполагает прогнозирование нагрузок на основе накопленных данных и подстраивание академического календаря к по-

вышенному потреблению ресурсов. При этом можно автоматизировать рутинные операции через портал самообслуживания, что сильно разгрузит ИТ-отдел, так как большая часть обращений решается без участия системного администратора).

Часть 4. Для поддержки вышеупомянутой практики необходимо использование Problem Management, т.е. создание базы данных повторяющихся случаев, например, ежегодные проблемы с регистрацией в начале учебного года или отказ ЛМС во время сессии. Это предполагает проактивный подход вместо реактивного, т.е. анализ повторяющихся инцидентов и устранение их причин. Это интегрируется с Monitoring and Event Management, с выявлением слабых мест еще до возникновения инцидентов.

Часть 5. Что касается разобщенности отделов университета, кафедр, ИТ-отдела – можно использовать практику Relationship Management, что позволит наладить каналы связи между отделами, а также назначить ИТ-кураторов, которые будут объяснять, что и как можно сделать, чтобы оптимизировать работу ВУЗа. Здесь же поможет Service Catalogue, т.е. создание общего перечня действий, доступных всем подрастаниям для обеспечения прозрачности.

Таким образом применение ITIL 4 может сократить время решения инцидентов, снизить число повторных обращений, увеличить удовлетворенность преподавателей и студентов. Помимо этого, применение описанных практик поможет оптимизировать учебный процесс, повысить прозрачность решения проблем для пользователей (статус обращения в личном кабинете), снизить нагрузку на ИТ-отдел за счет автоматизации рутинных процессов, сформировать культуру непрерывного улучшения через постоянный анализ причин инцидентов.

При этом стоит отметить, что успех применения концепций ITIL 4 зависит не от формального исполнения рекомендаций, а в их адаптации именно к специфике работы ВУЗа, с ее цикличностью нагрузки, многоуровневой структуре пользователей и ограниченными ресурсами. Для таких задач ITIL 4 подходит как нельзя лучше, учитывая его направленность на гибкость и адаптацию, в отличии от более жестких стандартов.

Список используемых источников

1. AXELOS, Limited ITIL® Foundation, ITIL 4 Edition / Limited AXELOS. Norwich: TSO (The Stationery Office), 2019. 212 с.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры СОД СПбГУТ, кандидатом технических наук, Ю. М. Бородянским.

APPLYING THE PRINCIPLES OF ITIL 4 TO OPTIMIZE IT SUPPORT PROCESSES AT THE UNIVERSITY

Denisova Y.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Currently, IT departments at universities face a significant increase in challenges due to the digitalization of higher education. For example, the emergence of personal accounts, distance learning, and the digitization of large amounts of information and processes. In such cases, the help desk is often unable to cope, resulting in low user satisfaction, a high number of errors, technical malfunctions, and so on. This article examines the application of ITIL 4 concepts to optimize IT support in a university environment. First, a typical situation is examined using a specific university as an example, identifying key operational challenges, such as disparate communication channels and incoming requests, the lack of a unified incident management system, and unclear service levels. To address these challenges, the authors propose using ITIL 4 concepts and offer practical options for improving the situation. The study demonstrates that ITIL 4 concepts can be successfully adapted to the educational environment without excessive bureaucracy, ensuring a balance between process structure and the flexibility necessary for working in an academic environment.

Key words: ITIL 4, IT support, higher education, support service, incident management, service levels, digital transformation of the university

УДК- 004.05
ГРНТИ- 20.51

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К РАЗРАБОТКЕ САЙТА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Н. А. Долгая, Т. В. Мусаева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются существующие требования к сайтам образовательных организаций. Помимо универсальных требований, применимых для веб-ресурсов разной направленности, к этим сайтам применяются специфические требования, связанные с родом деятельности организации. В том числе имеется объемный пакет законодательных, нормативных требований и разработанные на их основе методические рекомендации. В связи с этим при разработке и сопровождении сайта возникает сложность в вопросе соответствия основным требованиям с учетом особенностей и направленностью образовательной организации.

Предлагается анализ имеющихся требований и создание обобщающего классификатора существующих законодательных и прочих требований, что поможет в разработке современного эффективного сайта, как инструмента коммуникаций с пользователями, поддержки процесса обучения и улучшения имиджа организации.

образовательная организация, классификатор документов, требования к разработке сайта

Современные веб-сайты играют ключевую роль в развитии организации, формировании ее репутации и привлечении пользователей. Эффективность сайта напрямую зависит от того, насколько точно определены и реализованы требования к нему.

Проблематика данного вопроса, а именно, создания веб-сайта, отвечающего основным требованиям представлена в статьях [1, 2], что подтверждает его актуальность.

В зависимости от того насколько широко применяются эти требования их можно разделить на 2 категории:

1. Общие – для всех возможных веб-ресурсов.
2. Специфические – требования применимые к конкретным сайтам в зависимости от сферы деятельности организации.

Также основные требования для создания современного актуального веб-ресурса можно условно разделить на:

1. Технические требования касаются инфраструктуры и технических возможностей сайта.

2. Функциональные требования отражают задачи, которые сайт должен выполнять.

Дизайнерские требования связаны с внешним видом и удобством использования.

Юридические требования обеспечивают соответствие законодательству страны размещения сайта.

На рисунке 1 представлена общая классификация требований к разработке веб-сайта.

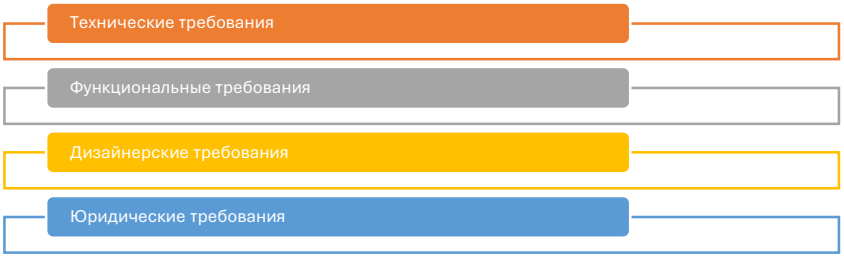


Рис. 1. Общая классификация требований к разработке веб-сайта

Технические и дизайнерские требования являются в большинстве своем универсальными общими требованиями для различных веб-ресурсов. Тогда как среди функциональных и юридических присутствует большое количество специфических требований, свойственных для сайтов определенного типа.

К сайтам образовательных организаций в связи с особенностями их деятельности применяется обширный список специфических требований, как функциональных, так и юридических, а в некоторых случаях и технических.

Если рассматривать юридические требования, то они декларируют необходимость обеспечения доступности, прозрачности и соответствия современным стандартам информационной среды.

Законодательной основой регулирования процессов создания и ведению сайтов образовательных организаций являются следующие документы:

1. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 N 273-ФЗ, Статья 29. «Информационная открытость образовательной организации», регулирует общедоступность информации об организации и ее деятельности, определяет перечень необходимых к размещению сведений в открытом доступе [3].

2. Постановление Правительства РФ от 20 октября 2021 г. № 1802 «Об утверждении Правил размещения на официальном сайте образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и обновления информации об образовательной организации» уточняет по-

рядок публикации информации на сайтах образовательных организаций, определяет, какая информация подлежит обязательной публикации и каким образом она должна быть организована [4].

3. Приказ Рособрнадзора от 4 августа 2023 г. № 1493 «Об утверждении Требований к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации» (далее Требования) устанавливает первоначальные требования к структуре сайта и формату представления информации, вводит расширенные требования к контенту [5].

4. Приказ Рособрнадзора от 3 июля 2025 г. № 1353 «О внесении изменений в Требования к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации, утвержденные приказом Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки от 4 августа 2023 г. № 1493» вносит поправки в предыдущий приказ, уточнив некоторые аспекты структуры сайта и формы представления информации [6].

Для правильной трактовки вех этих документов и недопущения нарушений образовательными организациями обязательных требований в части формирования открытых и общедоступных информационных ресурсов, были разработаны и выпущены «Официальные разъяснения обязательных требований по соблюдению образовательными организациями требований законодательства РФ в сфере образования в части информационной открытости образовательной организации» (далее Разъяснения) [7].

Также Рособрнадзором предложены «Методические рекомендации представления информации об образовательной организации высшего образования в открытых источниках с учетом соблюдения требований законодательства в сфере образования» (далее Рекомендации), где более подробно рассказывается об html-разметке, которая требуется только для сайтов высших учебных заведений. Данный документ по сути является инструкциями по работе с Приказом Рособрнадзора от 4 августа 2023 г. № 1493 для общеобразовательных организаций, но носит исключительно рекомендательный характер [8].

Согласно установленным нормам, официальные сайты образовательных организаций обязаны содержать определенные информационные блоки, разделы в установленном порядке и выполнять некоторые технические требования, которые в данном случае также являются специфическими.

Из Официальных разъяснений следует, что обязательными к структуре сайта являются требования:

– представление информации в разделе в виде набора страниц, и (или) иерархического списка, и (или) ссылок на другие разделы сайта;

– наличие общего механизма навигации по всем страницам раздела;
– наличие механизма навигации на каждой странице раздела;
– доступ к разделам должен с главной (основной) страницы сайта, а также из основного навигационного меню сайта;
– доступности страниц раздела без дополнительной регистрации;
– наличие на страницах разделов информации, копий документов, ссылок на файлы, указанных в Требованиях.

В Разъяснениях и Рекомендациях указывается состав подразделов обязательного раздела «Сведения об образовательной организации», установленный для всех типов образовательных организаций. Информация и документы, которые должны содержаться в данных подразделах, строго регламентируются требованиями.

В добавок ко всем вышеперечисленным документам в образовательных организациях имеется ряд локальных нормативных актов, содержащих требования по формированию структуры, функционала, информативному наполнению контента.

На рисунке 2 представлена информация об основных законодательных, нормативных, правовых и иных документах, используемых при создании сайта образовательной организации.



Рис. 2. Классификация основных документов и требований по созданию сайта образовательной организации

Также существуют требования технического характера для размещения информации об образовательной организации, к ним относятся: обязательное наличие версии для слабовидящих, размещение документации в электронном виде с электронными подписями, необходимость использовать специальные атрибуты тегов, позволяющих обеспечить идентифика-

цию ключевых элементов информации, облегчая поиск и проверку наличия обязательных к размещению данных.

Функциональные требования определяются целями и задачами учебного заведения.

Основными функциями сайта образовательной организации являются: продвижение образовательных услуг и популяризация учреждения, обеспечение взаимодействия внутри учебного заведения, информационная поддержка пользователей.

Функциональные требования зависят от групп пользователей, являющихся целевой аудиторией вэб-ресурсов образовательной организации, среди них: студенты, абитуриенты, преподаватели/сотрудники, родители студентов/абитуриентов, партнеры, работодатели, государственные органы. Так, например, существует потребность в функциональном сервисе, обеспечивающим абитуриентов удобным доступом к актуальной и достоверной информации, интегрирующим ключевые элементы значимых сведений об образовательных программах, рейтинговых оценках [9].

Для государственных органов главным является соблюдение всех требований законодательства РФ по размещению информации образовательной организации, изложенных выше. Соответственно необходимо наличие всех обязательных разделов и их корректное заполнение.

Сделаны следующие выводы: для повышение прозрачности, доступности и эффективности взаимодействия как между учебным заведением и обществом, так и внутри него самого возникает востребованность в создании структурированных документов для разработки и улучшения сайта образовательной организации, соответствующего как имеющимся нормативным актам, так и потребностям всех групп пользователей таких как: внутренние регламенты, рекомендации.

Список используемых источников

1. Козлов М. А. О требованиях к официальному сайту образовательной организации // Советник в сфере образования. Издательский дом «Советник бухгалтера», 2016. № 4. С. 16-23.

2. Федоркевич Е. В., Ветошев В. О. Оценка применимости требований к сайтам образовательных организаций // XXII царскосельские чтения: материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2018 г. Том 3, 2018. С. 99-103.

3. Федеральный закон от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 29.12.2025) «Об образовании в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2026) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/b819c620a8c698de35861ad4c9d9696ee0c3ee7a/ (дата обращения: 07.02.2026).

4. Постановление Правительства РФ от 20 октября 2021 г. № 1802 «Об утверждении Правил размещения на официальном сайте образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и обновления информации об обра-

зовательной организации, а также о признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» URL:http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110220045?ysclid=ml696i478l574475476/ (дата обращения: 07.02.2026).

5. Приказ Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки от 04.08.2023 № 1493 «Об утверждении Требований к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации» URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311290017?ysclid=ml50197869502950956/ (дата обращения: 07.02.2026).

6. Приказ Рособрнадзора от 3 июля 2025 г. № 1353 «О внесении изменений в Требования к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации, утвержденные приказом Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки от 4 августа 2023 г. № 1493» URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202510140008?ysclid=ml6adq3amo541162832/ (дата обращения: 07.02.2026).

7. Официальные разъяснения обязательных требований по соблюдению образовательными организациями требований законодательства Российской Федерации в сфере образования в части информационной открытости образовательной организации/ URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=482526&ysclid=ml6b3r0xjp239023354/ (дата обращения: 07.02.2026).

8. Методические рекомендации представления информации об образовательной организации в открытых источниках с учетом соблюдения требований законодательства в сфере образования (Вступают в силу с 01.09.2024) [URL: https://obrnadzor.gov.ru/wp-content/uploads/2024/05/ metodicheskie-rekomendaczii-predstavleniya-informaczii-ob-oo.pdf/ (дата обращения: 07.02.2026).

9. Слесаренко В., Мусаева Т. В. Разработка прототипа информационной системы по оказанию помощи абитуриенту // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2025. Ч. 4. С. 227-229.

ANALYSIS OF REQUIREMENTS FOR THE DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION'S WEBSITE

Dolgaia N., Musaeva T.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the existing requirements for educational organizations' websites. In addition to the universal requirements applicable to web resources of various types, these sites are subject to specific requirements related to the type of activity of the organization. Among other things, there is a comprehensive package of legislative and regulatory requirements and methodological recommendations developed on their basis. In this regard, when developing and maintaining a website, it becomes difficult to meet the basic requirements, taking into account the specifics and orientation of the educational organization. It is proposed to analyze the existing requirements and create a generalizing classifier of existing legislative and other requirements, which will help in developing a modern effective website as a tool for communicating with users, supporting the learning process and improving the image of the organization.

Key words: educational organization, document classifier, website development requirements

УДК- 004.05
ГРНТИ- 20.51

МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВЕБ-КОНТЕНТА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Н. А. Долгая, Т. В. Мусаева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается вопрос оценивания качества веб-контента образовательной организации. Проанализированы классические методы, в том числе на соответствие законодательным, регламентирующим документам и рекомендациям. Но, в каждой организации существуют локальные документы и требования по формированию структуры, функционала, информативному наполнению контента, с учетом особенностей, потребностей, корпоративного стиля и иных индивидуальных динамически меняющихся запросов. В этом контексте разработка и поддержка веб-сайтов сталкивается с проблемами обеспечения соответствия внешним и внутренним требованиям. В данной статье предлагается анализ методов контроля качества веб-контента, критериев оценки, а также учет местной специфики и требований, а также практические рекомендации для разработчиков и модераторов веб-контента.

образовательная организация, методы контроля качества контента сайта, критерии оценки качества веб-контента образовательной организации

В современном представлении веб-сайт образовательной организации является важным цифровым ресурсом, содержащим большой объем многомерных данных о деятельности организации, законодательных и нормативных документах, материально-технической базе, об образовательных программах, мероприятиях, структурных подразделениях, научной деятельности, о правилах приема и т.д. Все эти данные необходимы для получения доступной, открытой, прозрачной, актуальной информации для оценивания качества образования со стороны государственных контролирующих органов. Также, контент сайта играет ключевую значимость для абитуриентов с целью ознакомления и мотивирования для поступления в высшее учебное заведение. Повышение качества подачи необходимой для абитуриентов информации, помогает принять обдуманное и обоснованное решение.

Правильная качественная организация стилистики структурной, информационной, функциональной, корпоративной составляющих элементов веб-контента формирует уникальный единый имидж и обеспечивает эффективность ресурса [1].

Каждый отдельный элемент контента имеет уникальное назначение, но в совокупности это единая среда, которая должна гармонично функционировать и также отвечать на разные запросы.

В связи с тем, что как было обозначено выше, контент веб-сайта – это совокупность разных многомерных данных, то возникает проблематика объективности оценивания его качества по совокупности критериев. Методики анализа эффективности сайтов образовательных организаций на основе выстраивания системы оценки сайта рассмотрены в статье [2].

Для оценивания и контроля качества сайтов образовательных организаций существует несколько методик, представленных на рисунке 1.

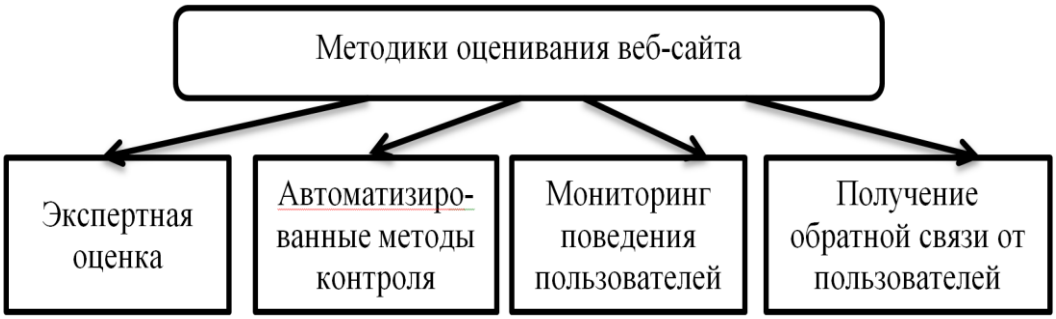


Рис. 1. Методики оценивания

Рассмотрим характеристики каждой методики.

1. Метод экспертной оценки используется как для комплексного анализа и выявления проблемных зон ресурса по разным направлениям, так и для проверки соответствия каким-то отдельным группам требований.

Экспертиза сайта проводится специалистами из разных областей, на такие критерии, как:

– оценка соответствия нормативно-правовым актам;
– оценка функциональности;
– оценка информационного содержания;
– удобство интерфейса;
– качество оформления;
– соответствие техническим требованиям современности и конкурентоспособности.

Преимуществом экспертной оценки является учет профессиональных знаний и опыта проверяющего, но эффективность метода серьезно зависимость от квалификации эксперта и его объективности.

2. Автоматизированные методы контроля, тестирования проводятся специальными программами и сервисами. Тесты технических параметров помогают проверить такие критерии, как:

– скорость загрузки страниц;
– совместимость с различными браузерами и устройствами;
– наличие ошибок кода и другие параметры.

Проверка соблюдения требований Приказа Рособрнадзора от 04.08.2023 № 1493 [3] осуществляется специальной информационной системой АИС «Мониторинг» на критерии:

– структура;
– доступность;
– гипертекстовая разметка;
– формат данных.

Преимуществами такого метода контроля является объективность, быстрота выполнения тестов, масштабируемость, но при этом невозможно учесть факторы человеческого восприятия и контекста использования.

3. Мониторинг поведения пользователей предполагает наблюдение за действиями посетителей сайта с применением инструментов сбора информации, аналитики, оценки, создания отчетов полезной для создателей и владельцев сайтов. К таким платформам относятся Google Analytics, Яндекс.Метрика с возможностями проверки на такие критерии, как:

– просмотр страниц;
– времени пребывания;
– частоты посещений;
– действий пользователя и т.д.

На основе полученных данных делаются выводы о качестве работы, эффективности веб-ресурсов, выработке рекомендаций по их совершенствованию. Преимуществом таких мониторингов является получение реальных данных о взаимодействии с ресурсом, возможность выявления узких мест, но при этом существует необходимость обработки больших объемов данных, и могут возникать сложности в интерпретации результатов.

4. Метод обратной связи от пользователей предполагает получение информации разными методиками социологического исследования. На сайте могут размещаться формы обратной связи и контакты для обращения пользователей. Пользователи делятся своими впечатлениями о сайте, указывают на недостатки и предлагают пути улучшения.

Для анализа и оценки применяются методы:

– анкетирования;
– наблюдение за действиями пользователей;
– опрос;
– сбор отзывов.

Преимуществом этого метода является прямое взаимодействие с пользователями, получение актуальных данных с учетом человеческого восприятия, но возможны искажения вследствие предвзятости респондентов и низкая репрезентативность выборки.

По результатам анализа методов и критериев на вопрос оценивания качества веб-сайта сформулированы практические рекомендации по совершенствованию сайта, представленные на рисунке 2.

Рассмотрим каждую из рекомендаций.

1. Совершенствование структуры сайта. Обеспечить удобную навигацию, ясное структурирование информации, интуитивно понятный интерфейс. Рекомендуется создание карты сайта и меню, ссылок, облегчающих поиск нужной информации и переход на нужные страницы.

2. Добавление информации и сервисов, необходимых разным группам потенциальных пользователей. Информация должна быть представлена в том объеме и форме, которая соответствует всем требованиям и нормативным нормам, а также отвечают запросам различных групп пользователей ресурса.

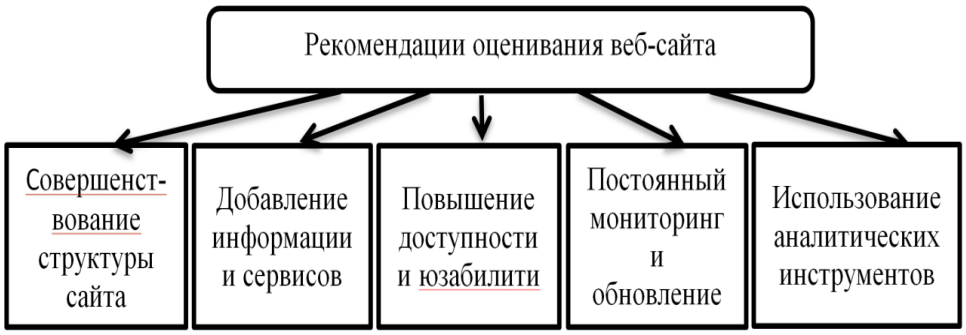


Рис. 2. Рекомендации оценивания

3. Повышение доступности и юзабилити [4]. Соблюдать все правила грамотного юзабилити, требования доступности для людей с ограниченными возможностями здоровья, поддерживать высокую скорость загрузки страниц и адаптивную верстку для мобильных устройств.

4. Постоянный мониторинг и обновление. Необходим регулярный мониторинг состояния сайта на соответствие всем актуальным требованиям

и нормам и своевременное устранение неполадок, которые помогут поддерживать ресурс в рабочем состоянии, без проблем проходить все внешние проверки и повышать доверие пользователей.

5. Использование аналитических инструментов. Применение инструментов позволит получать точные данные о поведении пользователей и принимать обоснованные решения по улучшению сайта.

На основании проведенного анализа, рассмотренных критериев требований стандартов на вопрос пригодности предложены рекомендации по созданию сайта образовательной организации, отвечающим внешним и внутренним требованиям, с учетом пожеланий потенциальных потребителей.

Список используемых источников

1. Слесаренко В., Мусаева Т. В. Разработка прототипа информационной системы по оказанию помощи абитуриенту // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2025. Ч. 4. С. 227-229.

2. Смирнова Т. А., Филоненко Д. Е., Почекутова Е. Н. Оценка эффективности сайтов образовательных организаций как инструмент управления качеством услуг// Развитие территорий. Новосибирск, 2023. № 3(33). С. 41-52.

3. Приказ Рособрнадзора от 04.08.2023 № 1493 (ред. от 03.07.2025) «Об утверждении Требований к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации»). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc LAW_ 463082/ (дата обращения: 24.02.2026).

4. ГОСТ Р ИСО 9241-210–2012. Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 210. Человеко-ориентированное проектирование интерактивных систем. URL: https://www.garant.ru/ (дата обращения: 24.02.2026).

METHODS AND CRITERIA FOR EVALUATING WEB CONTENT OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION

Dolgaia N., Musaeva T.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the quality of web content in educational institutions. Classic methods are analyzed, including compliance with legislative, regulatory, and recommended practices. However, each organization has its own specific documents and requirements for the structure, functionality, and content, taking into account specific needs, corporate style, and other dynamically changing individual requirements. In this regard, website development and maintenance face challenges in ensuring compliance with external and internal requirements. This article proposes an analysis of web content quality control methods, evaluation criteria, and consideration of local specifics and requirements, as well as practical recommendations for web content developers and moderators.

Key words: educational organization, methods of website content quality control, criteria for assessing the quality of web content of an educational organization

УДК 004.273
ГРНТИ 20.15.05

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КЛАССОВ НА ЯЗЫКЕ C++, СВЯЗАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ОТНОШЕНИЙ

Т. В. Ермакова, С. А. Коробов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Курс "Объектно-ориентированное программирование" читается в СПбГУТ много лет. За это время выявлены наиболее часто встречающиеся затруднения и ошибки при выполнении студентами лабораторных работ. Это связано с особенностями разработки классов на языке C++. В статье рассматриваются некоторые из этих особенностей при разработке классов, связанных отношениями наследования и включения. Даются указания и рекомендации по разработке и тестированию программ. Особое внимание уделяется разработке конструкторов классов и использованию указателей.

объектно-ориентированное программирование, отношение наследования, отношение включения, класс, указатель

Использование объектно-ориентированной парадигмы широко используется во всем мире. Однако, как выясняется, многие люди еще не освоили этот метод разработки проектов [1]. Именно этому методу посвящен курс "Объектно-ориентированное программирование" (ООП) который читается студентам в СПб ГУТ.

Классы в современных программах не существуют сами по себе. Класс может быть наследником другого класса. Объект может состоять из других объектов, которые выступают в качестве его атрибутов [2]. Две лабораторных работы в курсе ООП посвящены этим отношениям. При выполнении этих работ наибольшую проблему студенты испытывают при работе с указателями. Именно использование указателей придает языку Си огромную мощь, но и порождает множество проблем. В лабораторной работе, посвященной отношению включения, студенты периодически делают ошибки, связанные с указателями. На рис. 1 приведен пример такой ошибки. В данном случае в конструкторе с параметрами класса B, в 20-й строке студент присвоил указатель указателю. Студент откомпилировал и запустил программу. Первоначально кажется, что все нормально.

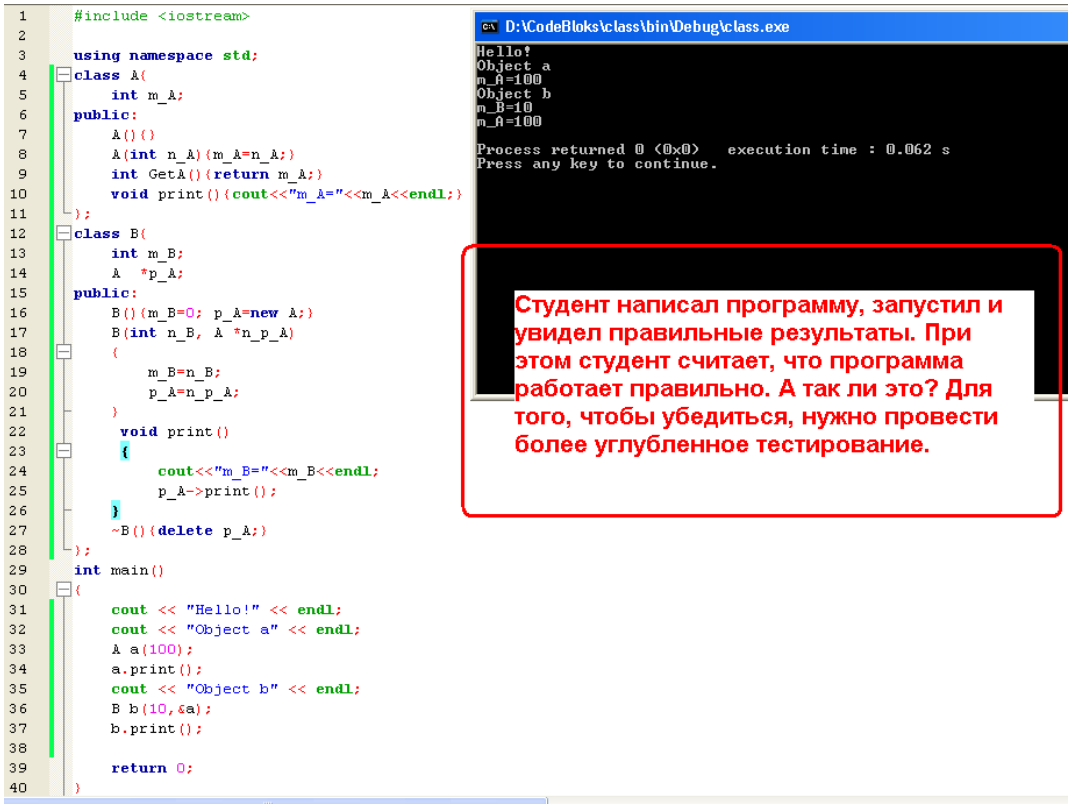


Рис. 1. Типичная ошибка при использовании указателей

Но если эту программу протестировать более серьезно, мы увидим ошибку, представленную на рис. 2.

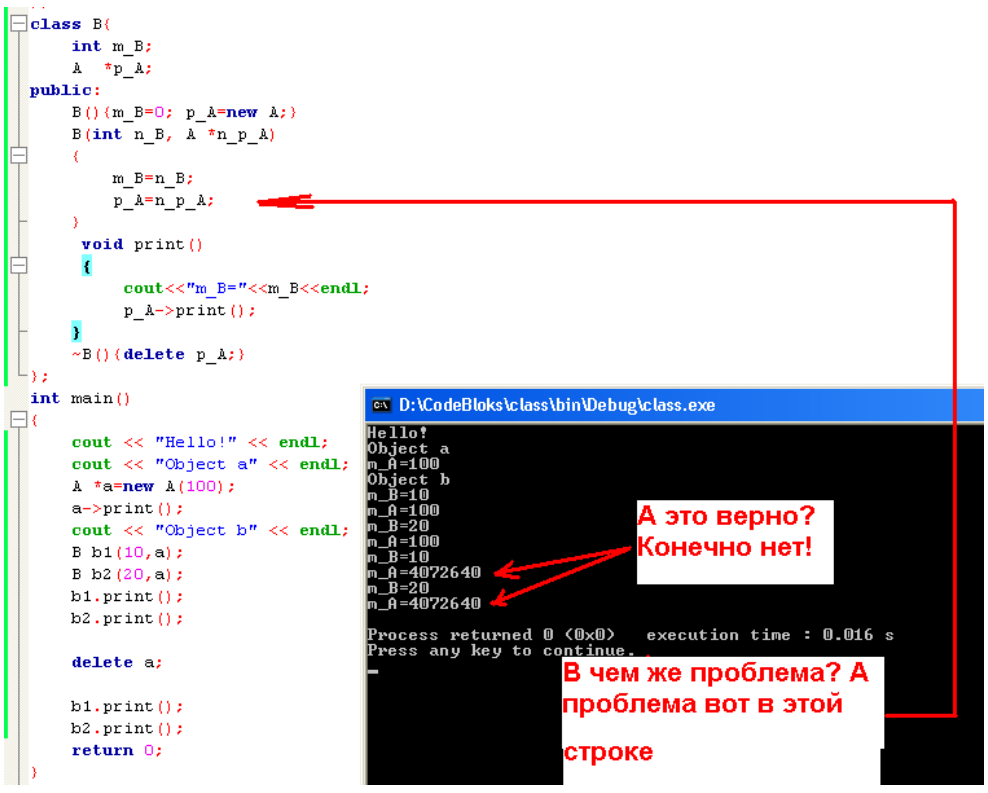


Рис. 2. Выявление ошибки

Правильным решение данной проблемы является использование конструктора копирования в строке 18, что представлено на рис. 3.

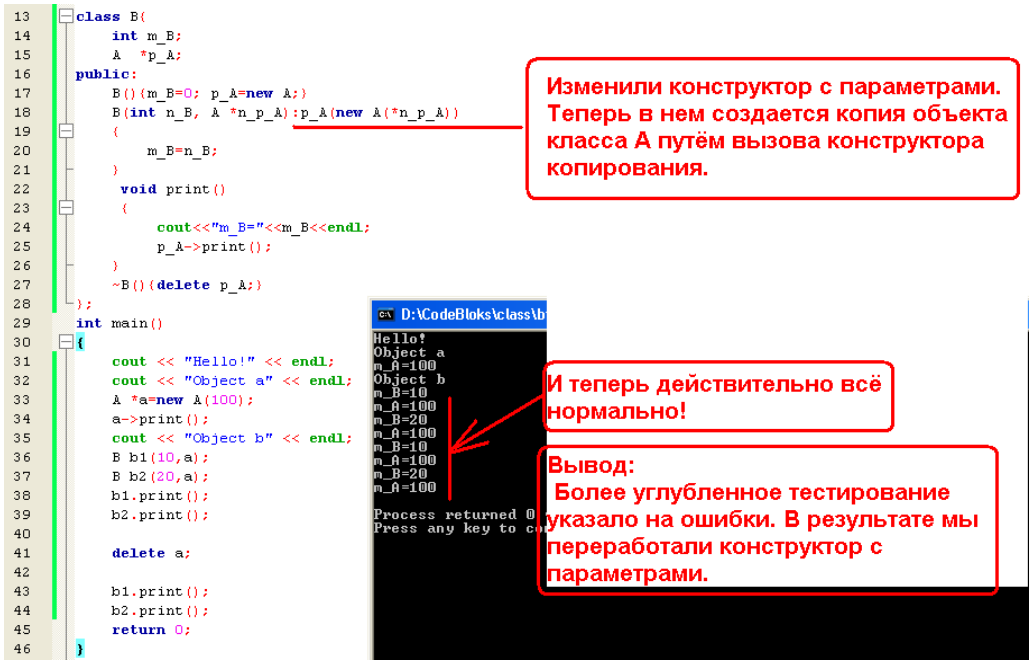


Рис. 3. Решение проблемы

Таким образом студенту рекомендуется использовать конструктор копирования и более тщательно тестировать программу.

Вторая типичная ошибка происходит в лабораторной работе, посвященной отношению наследования. В примере программы, приведенной на рис. 4. в строке, выделенной красным цветом, используется конструктор со списком инициализации.

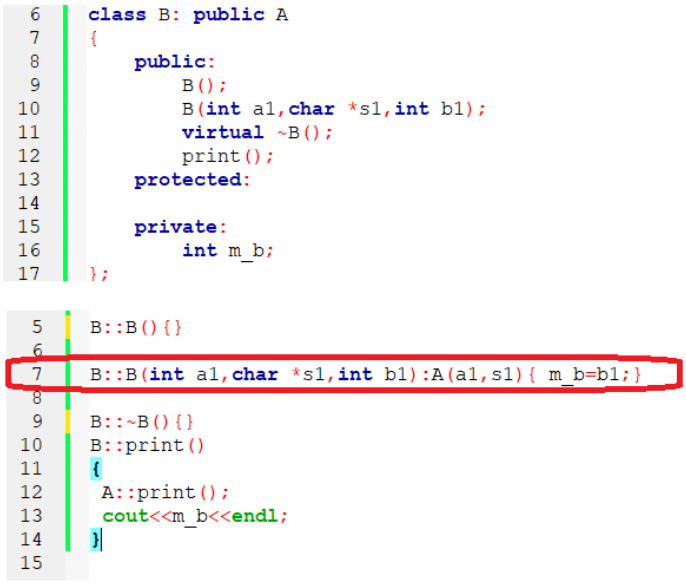


Рис. 4. Использование конструктора со списком инициализации

Студенты зачастую не обращают на это внимание, что в дальнейшем приводит к различным проблемам.

Студентам рекомендуется учитывать данный материал при выполнении лабораторных работ.

Список используемых источников

1. Буч, Гради, Максимчук, Роберт А., Энгл, Майкл У., Янг, Бобби Дж., Коналлен, Джим, Хьюстон, Келли А. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений // 3-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2008. ISBN 978-5-8459-1401--9 (рус.) С. 18.

2. Фридман А. Л. Основы объектно-ориентированной разработки программных систем // Финансы и статистика, 2000. ISBN 5-279-02287-X С. 34.

FEATURES OF DEVELOPING CLASSES IN C++ LANGUAGE RELATED TO VARIOUS TYPES OF RELATIONSHIPS

Ermakova T., Korobov S.
The Bonch-Bruevich St Petersburg State University of Telecommunications

The course «Object-Oriented Programming» has been taught at SPb SUT for many years. During this time, the most common difficulties and errors encountered by students during lab work have been identified. These difficulties are related to the specifics of developing classes in C++. This article discusses some of these issues when developing classes related by inheritance and inclusion relationships. Guidelines and recommendations for program development and testing are provided. Particular attention is paid to the development of class constructors and the use of pointers.

Key words: object-oriented programming, inheritance relationship, inclusion relationship, class, pointer

УДК 004.9
ГРНТИ 20.01.04

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ВЫСШЕМ УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Т. В. Ермакова, С. А. Коробов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются основные методы организации учебного процесса в высших учебных заведениях в условиях антироссийских станционных ограничений. Проанализировано влияние санкций в сфере IT-технологий на цифровизацию высшего образования, доступ к зарубежным образовательным платформам, программному обеспечению и научным ресурсам. Особое внимание уделено развитию отечественных цифровых образовательных платформ, дистанционных технологий обучения и систем управления учебным процессом, а также трансформации педагогических подходов в новых условиях. Рассматривается роль интеллектуальных цифровых инструментов и ИИ-помощников в образовательной среде российских вузов, так же их влияние на подготовку студентов технических специальностей. Сделан вывод что станционные ограничения стали своего рода вызовом для системы высшего образования в нашей стране, одновременно способствуют развитию национальной образовательной инфраструктуры и формированию устойчивых моделей организации учебного процесса.

высшее образование, учебный процесс, цифровизация, антироссийские санкции

Введение

В последние годы система высшего образования сталкивается с существенными изменениями, обусловленные совокупностью внешнеполитических и экономических факторов, в том числе антироссийскими санкционными ограничениями.

Указанные процессы оказывают влияние не только на международное академическое сотрудничество, но и на доступ высших учебных заведений к зарубежным образовательным платформам, научным базам данных и технологиям. В сложившихся условиях перед высшими учебными заведениями стоит задача сохранения качества образовательного процесса при адаптации его содержания и организационных форм к новым реалиям, Особое значение приобретает развитие и внедрение отечественных программных продуктов и цифровых платформ, рассматриваемых в качестве альтернативы ранее использовавшимся зарубежным ресурсам.

Цифровизация образовательной среды вуза становится одним из ключевых факторов устойчивого функционирования системы высшего образования. При этом изменения затрагивают как технологическую составляю-

щую, так и педагогические подходы, методы организации обучения и формы взаимодействия преподавателя и обучающихся.

Целью данной статьи является анализ влияния антироссийских санкций в IT-сфере на процессы цифровизацию и организацию учебного процесса в системе высшего образования на основе изучения и обобщения научных публикаций.

Вводимые санкции

С 2021 года антироссийские санкции в IT-сфере последовательно трансформировались от отдельных экспортных ограничений к комплексному воздействию на цифровую инфраструктуру и программное обеспечение. Наиболее значимое влияние на деятельность образовательных организаций оказали ограничения на поставку полупроводниковой продукции, использование облачных сервисов и корпоративного программного обеспечения, что привело к ускорению процессов импортозамещения и актуализации задачи формирования автономной национальной IT-экосистемы.

Как один из примеров можно отметить, что в октябре 2025 Европейский Союз утвердил 19-й пакет санкций, запрет на импорт сжиженного газа (LNG), расширенные финансовые ограничения, меры против энергетических доходов РФ и инструментов обхода санкций. К ограничениям добавилась блокировка доступа к определенным цифровым услугам и сервисам, включая IT- и космические сервисы [1]. В результате введенных санкционных мер был существенно ограничен доступ российских высших учебных заведений к ряду зарубежных цифровых платформ, программных продуктов и научных ресурсов. Санкционные ограничения оказали широкое и комплексное влияние на деятельность практически всех вузов нашей страны и важно отметить, что на ряду с блокировкой доступа к разным ресурсам так же сократилось международное академическое сотрудничество, участие в программах обмена, совместных образовательных и научных проектах. Например, в феврале 2022 года ФРГ сообщило «О прекращении сотрудничества с Россией в области научных исследований и профессиональной подготовки кадров», а уже в марте 2022 г членство 14 вузов из России было приостановлено в Европейской университетской ассоциации (European University Association) [2].

В сложившихся условиях традиционные формы организации учебного процесса потребовали пересмотра и адаптации. Возникла необходимость поиска альтернативных решений, опоры на внутренние ресурсы и активного развития национальных образовательных технологий, цифровых платформ и программного обеспечения, способных заменить ранее используе-

мые зарубежные аналоги. Указанные изменения обусловили корректировку содержания и направленности образовательных программ, в том числе по техническим и IT-направлениям подготовки.

Обобщая последствия введенных санкций в IT-сфере, можно выделить следующие ключевые результаты для системы высшего образования: ограничение доступа вузов к зарубежному программному обеспечению; прекращение или существенное сокращение использования облачных и SaaS-сервисов; усложнение международного научно-образовательного взаимодействия; необходимость ускоренного перехода на отечественные цифровые решения [3, 4].

Влияние введенных санкций на систему высшего образования

В условиях цифровой трансформации общества информационные технологии играют ключевую роль в развитии системы высшего образования. Наиболее выражено данное влияние проявляется в сфере IT-образования, где уровень подготовки специалистов напрямую зависит от доступности современных программных средств, цифровых платформ и возможностей международного научно-образовательного взаимодействия.

С 2021 года антироссийские санкции, затронувшие IT-сферу, существенно изменили условия функционирования высших учебных заведений. Ограничения на использование зарубежного программного обеспечения, облачных сервисов и цифровых образовательных платформ создали дополнительные вызовы для организации учебного процесса и реализации образовательных программ по техническим и информационным направлениям подготовки.

В сложившихся условиях особую актуальность приобретает анализ научных исследований, посвященных адаптации системы высшего IT-образования к санкционным ограничениям. Результаты подобных исследований позволяют выявить ключевые проблемы цифровизации образовательного процесса, а также определить перспективные направления его развития в условиях технологических ограничений и ограничений университетов.

В проанализированных научных трудах упоминается о том, что 16 ноября 2023 года в своем выступлении на форуме «Преобразование образования» Министр науки и высшего образования РФ В. Фальков сформулировал 3 основные задачи и пять принципов для развития высшего образования: Первая задача заключается в подготовке высококвалифицированных кадров под текущие и перспективные потребности рынка труда. Вторая задача состоит в формировании национальной идентичности, обеспечении единства поколений на культурном и ценностном уровне. Третья задача выдвигает на повестку дня обеспечение технологического лидерства страны, обеспе-

чение технологического суверенитета. Также в данном выступлении были сформулированы принципы современного высшего образования: принцип открытости системы высшего образования; принцип конкурентности; принцип фундаментальности; принцип практичности; принцип технологического лидерства. Совершенствование образовательного процесса в вузе на основе сформулированных принципов подразумевает использование таких цифровых технологий, как искусственный интеллект, цифровые платформы, роботизация, игрофикация и веб-квест, облачные технологии, VR-технологии и т.д. [5].

Цифровизация и дистанционные образовательные технологии

Одним из ключевых современных методов организации учебного процесса в высших учебных заведениях является цифровизация образования. Использование дистанционных и смешанных форм обучения позволяет обеспечить непрерывность образовательного процесса в условиях ограниченного доступа к внешним ресурсам, а также способствует оптимизации контроля знаний, организации самостоятельной работы студентов и развитию взаимодействия между преподавателем и обучающимися.

Цифровые технологии применяются в системе высшего образования на протяжении длительного времени, однако в условиях санкционных ограничений их значение существенно возросло. Внедрение электронных образовательных платформ и систем дистанционного обучения позволяет вузам адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования и снижать зависимость от зарубежных технологических решений.

В качестве одного из распространенных примеров цифровой образовательной среды можно выделить платформу Moodle, которая используется для организации учебного процесса, размещения учебных материалов, проведения тестирования и мониторинга учебной деятельности студентов. Использование данной платформы и ее отечественных модификаций способствует обеспечению устойчивости образовательного процесса и расширению возможностей управления обучением.

В условиях частичной или полной недоступности ряда зарубежных массовых онлайн-курсов российские образовательные организации все чаще используют национальные образовательные платформы, что способствует развитию внутреннего образовательного рынка и формированию собственных инфраструктурных решений. Анализ научных публикаций показывает, что в условиях ограничений на использование зарубежных сервисов видеосвязи и онлайн-коммуникации, например, таких как Zoom, в Российской Федерации активно развиваются отечественные цифровые платформы для дистанционного обучения. Их внедрение направлено

на обеспечение безопасного и стабильного взаимодействия участников образовательного процесса, а также на интеграцию различных элементов цифровой образовательной среды в единую информационную систему. Как пример можно привести образовательную платформу «Сферум», которая также позволяет проводить учебные занятия в дистанционном формате. С точки зрения государственных интересов «Сферум» России не только становится важным элементом цифровой образовательной среды, но и заменяет «Zoom» полностью. Таким же образом, не имея возможности пользоваться платформой «Coursera» (проект американской разработки в сфере массового онлайн-образования, прекратил свою деятельность в РФ в 2022 году) в России уже продолжительное время реализована возможность использовать отечественные площадки для онлайн-обучения, такие как Stepik, Skillbox, Инфоурок, GetCourse, Scyeng, Foxford, Geekbrains, Нетология, Skysmart, Яндекс.Практикум и пр. [2]

Переход на отечественное программное обеспечение и цифровые сервисы сопровождается рядом организационных и технологических сложностей, включая необходимость обновления материально-технической базы, повышения квалификации преподавателей и адаптации учебных программ. Вместе с тем данные процессы создают предпосылки для формирования устойчивой цифровой образовательной среды, ориентированной на долгосрочное развитие системы высшего образования.

Современные педагогические методы и подходы

Помимо технологических изменений, ключевую роль в организации учебного процесса играют современные педагогические методы. Среди наиболее эффективных подходов выделяются проектное обучение, практико-ориентированные методы, развитие критического мышления и формирование навыков самостоятельной работы студентов [6].

В условиях санкционных ограничений особое внимание уделяется развитию универсальных компетенций у обучающихся, их способности адаптироваться к изменяющимся условиям и работать с ограниченными ресурсами. Такой подход повышает конкурентоспособность выпускников и формирует готовность к профессиональной деятельности в условиях современных экономических и технологических изменений.

Роль преподавателя также претерпела изменения. Современный педагог в высшем учебном заведении выступает не только как источник знаний, но и как организатор учебного процесса, наставник и координатор деятельности студентов. Это предполагает активное использование электронных средств управления обучением, гибкое планирование учебных программ и постоянный мониторинг качества образовательного процесса.

Управленческие решения в вузах все чаще основываются на комплексном анализе внешней среды, включая глобальные, национальные и отраслевые тенденции, а также динамику потребностей рынка труда. В таких условиях педагогические методы должны сочетать теоретическую подготовку с практическими навыками, способствовать развитию исследовательской и проектной деятельности студентов и поддерживать интеграцию цифровых технологий в образовательную практику [7].

Таким образом, современные педагогические подходы в сочетании с цифровыми инструментами создают условия для формирования эффективной и устойчивой образовательной среды, способной адаптироваться к внешним ограничениям и обеспечивать высокий уровень подготовки специалистов.

Использование ИИ для учебного процесса

Рост обращений студентов технических специальностей к интеллектуальным цифровым инструментам связан с усложнением образовательных программ и необходимостью адаптации к быстро меняющимся технологическим условиям. В последние годы наблюдается активное использование таких инструментов, как ChatGPT и другие ИИ-платформы, для анализа учебного материала, подготовки письменных работ и формирования исследовательских навыков.

Особенно заметна тенденция среди студентов IT- и инженерных направлений, что объясняется высокой сложностью учебных дисциплин, необходимостью постоянного освоения новых технологий и ограниченным доступом к индивидуальным консультациям преподавателей. Исследования указывают на смещение характера обращений студентов: от запроса готовых решений к использованию ИИ как средства пояснения, структурирования информации и поддержки самостоятельной аналитической деятельности.

Рост использования интеллектуальных цифровых инструментов следует рассматривать в контексте общей цифровизации системы высшего образования. Современная образовательная среда все больше ориентируется на электронные платформы, дистанционные форматы обучения и самостоятельную работу студентов. В таких условиях ИИ-помощники обеспечивают оперативную обратную связь, адаптацию учебного материала под индивидуальные потребности и поддержку персонализированных образовательных траекторий.

В образовательной среде российских вузов применяются как зарубежные (реже, ввиду невозможности работать без VPN), так и отечественные ИИ-решения. К зарубежным относятся ChatGPT и аналогичные платформы,

в то время как отечественные разработки включают ЯндексGPT, VK AI и специализированные сервисы для работы с кодом, текстом и мультимедиа. На фоне санкционных ограничений растет роль локальных ИИ-решений и встроенных адаптивных систем, обеспечивающих устойчивость образовательного процесса.

Таким образом, использование ИИ в учебном процессе не является изолированным явлением, а представляет собой логичное следствие трансформации образовательной модели, ориентированной на автономность обучающихся, гибкость учебного процесса и интеграцию цифровых технологий в образовательную практику.

Заключение

Антироссийские санкции стали серьезным вызовом для системы высшего образования, в том числе для организации учебного процесса и цифровой инфраструктуры вузов. В тоже время они выступили стимулом для ускоренного перехода на отечественные программные продукты, образовательные платформы и адаптивные системы. Современные методы организации учебного процесса, основанные на цифровизации, использовании отечественных технологий и внедрении инновационных педагогических подходов, позволяют вузам сохранять качество образования и адаптироваться к новым условиям. Важную роль стали играть интеллектуальные цифровые инструменты и ИИ-платформы, обеспечивающие более гибкий подход к обучению и поддержку исследовательской деятельности студентов. Перспективы развития высшего образования в России связаны с укреплением внутреннего научно-образовательного потенциала, расширением цифровых возможностей и повышением устойчивости образовательной системы к внешним ограничениям. Развитие отечественных платформ и цифровых сервисов создает предпосылки для формирования независимой и устойчивой образовательной инфраструктуры, способной поддерживать подготовку высококвалифицированных специалистов даже в условиях внешних ограничений.

Список используемых источников

1. Directorate-General for Communication EU adopts new sanctions against Russia // PRESS RELEASE 23 October 2025.

2. Бурганова И. Н., Фарус О. А. Перспективы высшего образования РФ в условиях антироссийских санкций // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 8 (146).

3. Новые санкции США в сфере IT. С какими последствиями столкнулся бизнес // РБК. Война санкций. 13.09.2024 г.

4. Пятая часть «критических» компаний не успеет перейти на российский софт // РБК. Война санкций. 12.10.2023 г.

5. Жуковская И. Е., Мамажанов И. Г., Абдуллаев М. К., Ходжаева М. С. Пути повышения качества образовательного процесса в высших учебных заведениях на основе внедрения цифровых технологических и программных решений // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета // Экономика предприятий, регионов и отраслей. 2024. № 2 (146).

6. Курпаяниди К. И. Проблемы совершенствования организации учебного процесса в системе высшей школы // Бюллетень науки и практики, научный журнал №1 (декабрь) 2016.

7. Виньо А., Байков А. А., Калюжнова Е. Российское высшее образование в условиях санкций: конструктивистский взгляд. // Полис. Политические исследования. 2022. № 4. С. 47-62. DOI: 10.17976/jpps/2022.04.05.

MODERN METHODS OF ORGANIZING THE EDUCATIONAL PROCESS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS UNDER THE CONDITIONS OF SANCTIONS RESTRICTIONS

Ermakova T., Korobov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the main methods of organizing the educational process at higher education institutions under sanctions against Russia. It analyzes the impact of IT sanctions on the digitalization of higher education, access to international educational platforms, software, and scientific resources. Particular attention is paid to the development of domestic digital educational platforms, distance learning technologies, and educational management systems, as well as the transformation of pedagogical approaches in the new environment. The role of intelligent digital tools and AI assistants in the educational environment of Russian universities and their impact on the training of students in technical fields are considered. It is concluded that sanctions have become a challenge for the higher education system in our country, while simultaneously facilitating the development of national educational infrastructure and the formation of sustainable models for organizing the educational process.

Key words: higher education, educational process, digitalization, sanctions against Russia

УДК 378.147
ГРНТИ 14.35.09

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРЕПОДАВАНИЯ ЧИСЛЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В УНИВЕРСИТЕТАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С ФОКУСОМ НА ЗАДАЧИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ И АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ

А. В. Киселева, Е. Д. Петрова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Настоящая статья рассматривает специфику преподавания дисциплины «Численные математические методы» (ЧММ) в контексте подготовки высококвалифицированных специалистов для сферы телекоммуникаций, имеющих компетенции в области кибербезопасности и автономных систем (БПЛА). Актуальность традиционных численных алгоритмов критически повышается при их прямой привязке к решению задач, связанных с моделированием устойчивости систем связи, подверженных масштабным помехам, включая угрозы для глобальных спутниковых сетей типа Starlink. В работе предлагается модульная структура курса ЧММ, ориентированная на практическую реализацию методов (Python, MATLAB) для решения задач, смоделированных на основе реальных сценариев киберугроз, динамики БПЛА и обеспечения помехоустойчивости современных каналов связи.

методика преподавания, специфика обучения, численные методы, кибербезопасность, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), телекоммуникации, starlink, помехоустойчивость, метод Рунге-Кутты

Современные телекоммуникационные системы и инфраструктуры кибербезопасности функционируют в условиях постоянного роста сложности и необходимости быстрой обработки больших объемов данных. Классические аналитические решения часто оказываются неприменимыми из-за нелинейности процессов, стохастического характера помех или недостаточной вычислительной мощности для аналитического решения уравнений в реальном времени.

Студенты, ориентированные на кибербезопасность, учащиеся на таких специальностях как, инфокоммуникационные технологии и системы связи, безопасность компьютерных систем, разработка программного обеспечения и приложений искусственного интеллекта в киберфизических системах, анализ данных, прикладной искусственный интеллект и многие другие,

должны владеть аппаратом численных математических методов (ЧММ) не просто как теоретическим знанием, но как инструментом для быстрой разработки защитных и аналитических алгоритмов. Это требует пересмотра традиционной методики преподавания ЧММ, которая часто излишне фокусируется на доказательствах сходимости в ущерб практическому применению в смежных областях.

Роль численных методов в решении неанализируемых задач чрезвычайно важна. Численные методы играют ключевую роль в решении задач математического анализа, особенно там, где точные аналитические методы неприменимы [1]. К примеру, дифференциальные уравнения играют ключевую роль в математическом моделировании процессов в различных областях науки и техники. Их решение позволяет описывать эволюцию систем со временем, будь то физические, биологические или экономические процессы. Однако аналитические решения возможно получить лишь для ограниченного класса дифференциальных уравнений. Для более сложных систем требуются численные методы, которые дают приближенные, но достаточно точные решения [2]. Именно эта потребность в приближении, а не в точности, является основой для моделирования реальных, телекоммуникационных систем.

Модульная структура курса ЧММ для специалистов по кибербезопасности широко применяется в нашем и во многих других университетах.

Предлагается внедрение более объемной модульной системы, где каждый крупный численный метод увязывается с конкретной задачей из области телекоммуникаций и кибербезопасности.

Актуальные в наше время задачи кибербезопасности и БПЛА

I. Решение нелинейных уравнений, метод бисекции, метод Ньютона. Задача: Поиск оптимального ключа шифрования, анализ точек бифуркации в нелинейных системах связи.

II. Численное интегрирование. Формулы трапеций, Симпсона. Задача: Расчет накопленной вероятности ошибки (BER) в канале при стохастических помехах.

III. Решение систем линейных уравнений (СЛАУ). Методы Якоби, Зейделя, LU-разложение. Задача: Декодирование систем сжатия данных, решение систем уравнений при триангуляции местоположения БПЛА по данным с нескольких приемников.

IV. Численное дифференцирование. Разложение в ряд Тейлора. Разностные схемы. Задача: Реализация анализа робастности алгоритмов шифрования (чувствительность к малым изменениям входных данных).

V. Численное решение ОДУ. Метод Эйлера, Рунге-Кутта 4-го порядка. Задача: Моделирование динамики полета БПЛА и отслеживание траектории в условиях сбоя GPS-сигнала (инерциальная навигация).

Применение ЧММ в моделировании автономных систем (БПЛА) и сетей связи

Проблематика беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и глобальных спутниковых систем (таких как Starlink) становится ключевой в современных телекоммуникационных сетях. Эти системы характеризуются высокой степенью зависимости от стабильности радиосигнала и уязвимостью к целенаправленным помехам (РЭБ). Численные методы здесь незаменимы для моделирования и обеспечения робастности.

Моделирование динамики БПЛА и помехоустойчивости: для задачи управления БПЛА, где необходимо минимизировать отклонение от заданной траектории, мы используем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).

Критически важным моментом становится моделирование эффектов РЭП (Радиоэлектронного Подавления), т.к. в отличие от локальных помех, угрозы, направленные на крупные системы, могут быть более изощренными. Студентам предлагается реализовать Метод Рунге-Кутты 4-го порядка для интегрирования динамики полета в условиях, имитирующих атаки на GNSS-сигналы (спуфинг/джамминг), а именно, моделируется внезапное изменение координат или уровня шума в канале связи, что требует от алгоритма управления БПЛА быстрого перехода на инерциальную навигацию.

Сценарий «Зона отказа» (на примере Starlink): моделируется ситуация, когда значительная часть спутников в зоне покрытия временно выводится из строя или подвергается сильному зашумлению. Студент должен численно оценить, как быстро и с какой погрешностью наземная станция сможет переключиться на резервный канал или другой спутник, используя численные методы оценки качества сигнала (например, расчет BER с помощью численного интегрирования).

Численные методы в задачах кибербезопасности

Для студентов кибербезопасности ЧММ служат основой для криптоанализа и защиты данных. Например, анализ криптостойкости: проверка стойкости шифров, основанных на нелинейных системах, часто сводится к нахождению корней или инверсии матриц, описывающих ключевое пространство. Студенты применяют Метод Ньютона для систем нелинейных уравнений для поиска “слабых” векторов, которые могут привести к взлому, или для оптимизации параметров хеш-функций. Преподавание ЧММ для данной специальности требует смещения акцента с теоретического обоснования на реализацию, векторизацию и оценку ошибки.

Очень важно преподавать студентам программирование как инструмент: минимум 60 % учебного времени должно быть посвящено программированию на Python (библиотеки NumPy, SciPy) или MATLAB. Студенты должны уметь не только написать код метода, но и проанализировать его производительность (скорость сходимости, вычислительную сложность). Анализ сходимости и ошибки: особое внимание уделяется понятию абсолютной и относительной погрешности. В контексте БПЛА это напрямую переводится в погрешность навигации.

Невероятно важно и развитие проектно-конструктивных способностей (АВС-подход): эффективность обучения в современных условиях требует, чтобы студенты развивали не только объем усвоенных знаний, но и комплексные навыки их применения. Каждый человек решает любую проблему через одну и ту же последовательность действий: А – формализует проблему, т.е. на фоне своих знаний преобразует проблему в известную задачу; В – на фоне наличных знаний конструирует решение задачи; С – на фоне своих знаний реализует это решение на практике. Таким образом, в жизни успешность разрешения профессиональных проблем во многом зависит от способности инженера быстро и качественно произвести эти АВС – действия в комплексе на фоне имеющихся у него знаний. Из сказанного следует, что любое эффективное учебное пособие должно способствовать быстрому развитию АВС – способностей и глубокому усвоению знаний через специально организованную учебную деятельность [3].

Следует не забывать и о методике работы с ошибками: принцип развития критического мышления реализуется через задания на анализ ошибочных решений. Вместо прямого запроса на генерацию корректного кода студенту предлагается изучить решение, содержащее намеренно внесенные ошибки: нарушение условий сходимости, некорректный выбор шага дис-

кретизации, игнорирование особенностей машинной арифметики. Такой подход формирует у обучающихся привычку к обязательной верификации любого ИИ-генерированного результата и развивает способность распознавать типичные ошибки вычислительных алгоритмов [4]. Метод вариативных ошибок заключается в предоставлении студенту нескольких версий решения с различными типами ошибок для сравнительного анализа и классификации [5].

В заключении отметим, ЧММ как стратегический приоритет в подготовке специалистов: современный ландшафт телекоммуникаций и кибербезопасности характеризуется беспрецедентной скоростью технологического развития и ростом сложности угроз. В этой динамичной среде Численные Математические Методы перестают быть вспомогательной дисциплиной и становятся ядром компетенций для инженера-аналитика.

Необходимость срочной подготовки квалифицированных специалистов, способных не только использовать готовые программные продукты, но и разрабатывать, верифицировать и модифицировать алгоритмы в условиях реального времени, диктует новые требования к преподаванию ЧММ в университетах телекоммуникаций. Целью является подготовка эффективных специалистов для быстрого реагирования на угрозы, потому что способность быстро численно моделировать отклик систем связи на атаки (будь то РЭП против БПЛА или попытки криптоанализа) напрямую зависит от глубины понимания сходимости и ошибок численных схем.

Стратегическое значение трудно переоценить, т.к. в контексте управления автономными системами и обеспечения устойчивости критической инфраструктуры, ошибки в численных расчетах могут привести к прямым системным сбоям. Таким образом, эффективное и актуализированное преподавание ЧММ является не просто академической задачей, но стратегическим приоритетом в подготовке кадров, обеспечивающих технологический суверенитет и безопасность.

Внедрение модульной структуры, ориентированной на задачи кибербезопасности (БПЛА, Starlink), и повышение качества аналитических навыков через работу с ошибками, является необходимым шагом для выпуска специалистов, готовых к вызовам современного цифрового мира.

Список используемых источников

1. Акмырадов Я.Ч., Хекимбаева Ш., Оразмырадова Г.Ч. Численные методы в математическом анализе // Вестник науки, т. 1, № 10 (79), 2024, с. 534-539.

2. Моргунов М. В., Балабан Е. И. Численные методы решения дифференциальных уравнений и их применение в различных областях // Материалы XVII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». URL: https://scienceforum.ru/2025/article/2018038033 (дата обращения: 05.03.2026).

3. Барон Л. А. Рецензенты: докт. пед. наук, проф. Л. Н. Журбенко, канд. техн. наук, доц. Е. А. Печеный. Численные методы для IT инженеров: учеб. пособие для вузов // Л. А. Барон, Н. К. Нуриев, С. Д. Старыгина. Казань, 2012. 176 с.

4. Леденцова М. В. ИИ-ассистенты в обучении численным методам: Помощники или угроза пониманию? // Вестник науки №2 (95) том 3. С. 315 – 323. 2026 г. Issn 2712-8849 // электронный ресурс: Https://www.вестник-науки.рф/article/28941.

5. Микаилов В. Ш., Исмаилов М. Т., Фаталийев Х. К., Фарзалиев Э. Б. Применение вибромацерации при получении виноматериалов. Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств», 27-28 апреля 2011 г. Республика Беларусь, Могилев. Часть 1: стр. 119-120.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры ВМ СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом О. Б. Терушкиной

FEATURES OF TEACHING NUMERICAL MATHEMATICAL METHODS IN UNIVERSITIES OF TELECOMMUNICATIONS WITH A FOCUS ON CYBERSECURITY AND AUTONOMOUS SYSTEMS

Kiseleva A., Petrova E.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article discusses the specifics of teaching the discipline «Numerical Mathematical Methods» (NMM) in the context of training highly qualified specialists for the telecommunications industry with expertise in cybersecurity and autonomous systems (UAVs). The relevance of traditional numerical algorithms is significantly enhanced when they are directly linked to solving problems related to modeling the stability of communication systems that are subject to large-scale interference, including threats to global satellite networks such as Starlink. The paper proposes a modular structure of the CMM course, which is focused on the practical implementation of methods (Python, MATLAB) for solving problems based on real-world cyberthreat scenarios, UAV dynamics, and ensuring the noise immunity of modern communication channels.

Key words: teaching methods, training specifics, numerical methods, cybersecurity, unmanned aerial vehicles (UAVs), telecommunications, starlink, noise immunity, the Runge-Kutta method

УДК 004.89
ГРНТИ 28.23

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

О. А. Козлова, Т. В. Матюхина, О. В. Раковский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Разработка программного обеспечения в настоящее время характеризуется ускорением жизненного цикла продуктов, дефицитом квалифицированных специалистов и необходимостью повышения качества кода при ограниченных ресурсах. Искусственный интеллект, особенно на основе больших языковых моделей, открывает новые горизонты для автоматизации этих процессов, позволяя генерировать код, оптимизировать тестирование и поддерживать системы DevOps.

искусственный интеллект, большие языковые модели, разработка ПО, LLM, LLM агент, автоматизация разработки, генерация кода, DevOps, машинное обучение

Современный рост вычислительных мощностей и растущие требования к разработке ПО приводит к активному применению ИИ и нейронных сетей для генерации кода, тестирования и оптимизации. Генерация кода с использованием больших языковых моделей (LLM) позволяет автоматизировать написание шаблонного кода, выполнить рефакторинг и даже осуществить создание целых модулей на основе естественного языка. Модели обучаются на существующих ресурсах открытого кода (GitHub, Stack Overflow), что обеспечивает высокую точность подсказок. Для этого используется подход RAG (Retrieval-Augmented Generation), при котором результат формируется из данных внешних источников. Таким образом, без необходимости дообучения используемой модели LLM, можно использовать и анализировать актуальные данные для формирования результирующего кода.

Представляется актуальным использование LLM агентов, которые являются программной системой на основе LLM модели, которая решает порядок действий, необходимых для достижения цели. Агент не использует жесткого сценария, а определяет итерации, выбирает какие доступные ин-

струменты вызывать, выполняет декомпозицию комплексных задач на подзадачи, решает, когда надо выдавать ответ, опираясь на ответы модели.

В настоящее время существуют автономные сервисы и проекты типа AutoGPT, позволяющие использовать LLM агенты для решения нетривиальных задач. На рис. 1 представлена архитектура LLM агентов.

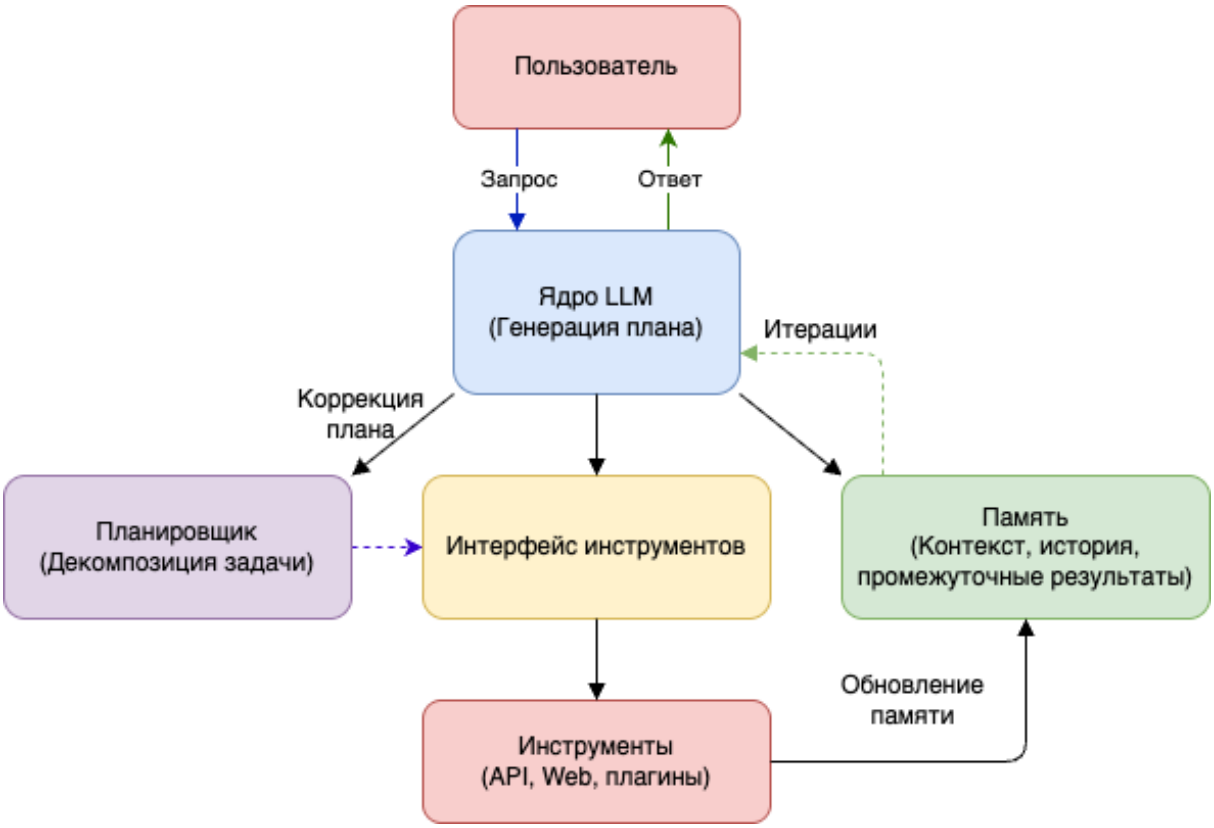


Рис. 1. Архитектура LLM-агента [1]

LLM агенты логично интегрировать в CI/CD-пайплайны на этапах сборки, тестирования и развертывания, где они смогут предсказывать ошибки при тестировании, генерировать модульные тесты и динамически масштабировать используемые ресурсы. При этом время релиза существенно сокращается за счет анализа логов в реальном времени.

Таким образом, методы ИИ будут полезными как при CI (Continuous Integration), когда вносятся изменения в код и осуществляется проверка соответствия ПО критериям качества, так и при CD (Continuous Delivery), когда программное обеспечение интегрируется в целевое окружение пользователей.

Применение ИИ при разработке ПО имеет достоинства и ограничения:

1. Генерация и автодополнение кода

LLM модели способны генерировать фрагменты кода на различных языках программирования, предлагать автодополнения и даже создавать целые модули на основе текстовых описаний. Примеры инструментов: GitHub Copilot, Amazon CodeWhisperer, Tabnine.

Достоинства:

– ускорение написания кода;
– снижение количества синтаксических ошибок;
– поддержка малоопытных разработчиков.

Ограничения:

– возможность генерации неоптимального или небезопасного кода;
– зависимость от качества обучающих данных.

2. Оптимизация архитектуры и рефакторинг

LLM анализируют существующий код, предлагают улучшения архитектуры и автоматизируют рефакторинг. Примеры инструментов: Sourcery, DeepCode, Codacy.

Достоинства:

– повышение читаемости и поддерживаемости кода;
– автоматическое выявление узких мест.

Ограничения:

- сложность интерпретации контекста крупных проектов;
- риск избыточного рефакторинга.

3. Автоматизация тестирования

LLM генерируют тестовые случаи, анализируют покрытие кода и выявляют потенциальные уязвимости. Примеры инструментов: Diffblue, Testim, Applitools.

Достоинства:

– увеличение покрытия тестами;
– снижение затрат на ручное тестирование.

Ограничения:

– сложность генерации комплексных интеграционных тестов;
– риск ложноположительных результатов.

4. Автоматическая генерация документации

LLM создают и обновляют документацию на основе анализа кода и комментариев. Примеры инструментов: Swimm, Doxygen, Sphinx.

Достоинства:

– снижение затрат на поддержку актуальной документации;
– повышение доступности информации для новых участников проекта.

Ограничения:

– сложность генерации высокоуровневой архитектурной документации;
– зависимость от качества исходных комментариев.

5. Интеграция LLM в процессы DevOps

LLM интегрируются в CI/CD-пайплайны, автоматизируя развертывание, мониторинг и откат изменений. Примеры инструментов: Jenkins с плагинами на основе ИИ, GitLab Auto DevOps.

Преимущества:

– ускорение циклов выпуска;
– автоматическое выявление аномалий в production.

Ограничения:

– сложность настройки и обучения моделей под специфику проекта;
– риски безопасности при автоматизации критически важных процессов.

Подводя итог, можно сделать вывод, что применение искусственного интеллекта на основе больших языковых моделей революционизирует разработку программного обеспечения, автоматизируя рутинные задачи и повышая продуктивность команд, и обеспечивают существенное ускорение процессов генерации кода и автоматизации CI/CD, как показано на приведенных примерах.

Перспективы интеграции таких технологий в российские ИТ-проекты особенно велики: от оптимизации телекоммуникационных систем до образовательных платформ, где они повысят инновационный потенциал и конкурентоспособность отрасли. Однако, для полноценной интеграции требуется решение ряда технических, этических и организационных вопросов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение надежности, безопасности [2] и адаптивности ИИ-инструментов в реальных условиях разработки [3-7].

Список используемых источников

1. Как устроены LLM-агенты: архитектура, планирование и инструменты. URL: https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/916798/ (дата обращения: 29.01.2026).

2. Роль ИИ и машинного обучения в кибербезопасности в 2025 году. URL: https://lazarusalliance.com/ru/the-role-of-ai-and-machine-learning-in-cybersecurity-in-2025/ (дата обращения: 01.02.2026).

3. Раковский О. В., Аньшаков А. Е. Анализ и разработка отечественного ПО для САПР-проектирования // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025); сб. науч. ст.: в 3 т. СПб.: СПбГУТ, 2025. Т. 1. 775 с. С. 678-683.

4. Литвинов В. Л. Применение технологий искусственного интеллекта в управлении современными и перспективными телекоммуникационными инфраструктурами /

В. Л. Литвинов, О. В. Раковский, Л. П. Козлова, О. А. Козлова // Электросвязь. 2025. № 9. С. 82-90.

5. Матюхина Т. В., Раковский О. В. Применение мультиагентных систем и искусственного интеллекта для системы контроля учебной деятельности университета // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 2 т. СПб.: СПбГУТ, 2025. Т. 1. 744 с. С. 479-484.

6. Раковский О. В. Обеспечение информационной безопасности в облачных вычислительных средах с применением искусственного интеллекта // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 2 т. СПб.: СПбГУТ, 2025. Т. 1. 744 с. С. 518-522.

7. Rakovskii O. V. Integration of artificial intelligence methods into modern software engineering processes: new approaches, challenges and prospects // В сборнике: Вестник факультета Социальных технологий и экономики данных. Сборник научно-теоретических статей XXVII Международного Балтийского коммуникационного форума. Санкт-Петербург, 2025. С. 759-762.

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO AUTOMATE SOFTWARE DEVELOPMENT

Kozlova O., Matyukhina T., Rakovskii O.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Software development is currently characterized by an accelerated product lifecycle, a shortage of qualified specialists, and the need to improve code quality with limited resources. Artificial intelligence, especially based on large language models, opens up new horizons for automating these processes, allowing you to generate code, optimize testing, and support DevOps systems.

Key words: artificial intelligence, large language models, software development, LLM, LLM agent, development automation, code generation, DevOps, machine learning

УДК 004.02 +519.23
ГРНТИ 50.05+27.43.51

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ PYTHON И R В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ

П. В. Косов, Р. Я. Лабковская

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В условиях цифровой трансформации и экспоненциального роста объемов информации задачи анализа больших данных приобретают стратегическое значение для науки и бизнеса. Среди инструментов, применяемых для обработки и моделирования данных, наиболее распространенными являются Python и R. Несмотря на схожесть областей применения, данные языки формировались в разных научно-прикладных традициях и демонстрируют различные преимущества в зависимости от типа аналитической задачи. В статье проводится сравнительный анализ Python и R в контексте пяти ключевых направлений анализа данных: предобработка, кластеризация, классификация, прогнозирование и обнаружение аномалий.

большие данные, Python, R, машинное обучение, кластеризация, классификация, прогнозирование, обнаружение аномалий

Развитие технологий хранения и обработки данных привело к формированию парадигмы Big Data, характеризующейся высокими объемами, скоростью генерации и разнообразием источников информации. Эффективная работа с такими массивами требует специализированных инструментов, обеспечивающих как вычислительную масштабируемость, так и развитые методы статистического анализа.

Наиболее распространенными языками программирования в аналитической практике являются Python и R [1, 2]. Python изначально развивался как универсальный язык общего назначения и впоследствии стал основой современной инфраструктуры машинного обучения [3]. R, напротив, возник в академической статистической среде и ориентирован на глубокий аналитический и исследовательский анализ данных [3].

Целью работы является сопоставление возможностей Python и R для решения фундаментальных задач анализа больших данных и определение области(ей) их наибольшей эффективности.

Предобработка данных

Предобработка данных является обязательным этапом аналитического цикла и включает очистку, трансформацию, нормализацию, агрегацию и генерацию признаков.

В экосистеме Python ключевую роль играют библиотеки Pandas и NumPy, обеспечивающие эффективную работу со структурированными и многомерными данными. Для обработки массивов, превышающих объем оперативной памяти, применяются распределенные инструменты (Dask, PySpark), что позволяет интегрировать этап предобработки в масштабируемые вычислительные конвейеры. На рис. 1 рассмотрен пример очистки и агрегации данных. Код генерирует синтетический набор из 100 наблюдений с 3 категориями ('A', 'B', 'C'), значениями вокруг 50 с шумом, 10 % пропусков, сохраняет в CSV, затем очищает пропуски, добавляет логарифмический признак и строит столбчатую диаграмму средних значений по категориям:

```python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Генерация данных (рис. 1)
np.random.seed(42)
n = 100
categories = np.random.choice(['A', 'B', 'C'], size=n)
values = np.random.randn(n) * 10 + 50  # значения около 50
# Добавим немного пропусков (10%)
missing_idx = np.random.choice(n, size=int(n*0.1), replace=False)
values[missing_idx] = np.nan
df = pd.DataFrame({'category': categories, 'value': values})
df.to_csv('data.csv', index=False)
print("Файл data.csv создан")
# Очистка и агрегация (рис. 2)
df = pd.read_csv("data.csv")
df_clean = df.dropna()
df_clean["log_value"] = np.log(df_clean["value"])
grouped = df_clean.groupby("category")["value"].mean()
grouped.plot(kind="bar")
plt.title("Среднее значение по категориям (Python)")
plt.ylabel("Среднее значение")
plt.xlabel("Категория")
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рис. 1. Очистка и агрегация данных на Python

В R предобработка организована в рамках концепции tidy data, реализуемой через набор пакетов tidyverse (dplyr, tidyr и др.). Для повышения производительности используется data.table, оптимизированный для операций с крупными таблицами в памяти. На рис. 2 рассмотрен пример очистки и агрегации данных на R.

```r
library(tidyverse)
# 1. Генерация синтетических данных
set.seed(42)
n <- 100
df <- tibble(
  category = sample(c("A", "B", "C"), size = n, replace = TRUE),
  value = rnorm(n, mean = 50, sd = 10)
) %>%
  # Добавляем пропуски (10%) случайным образом
  mutate(value = if_else(row_number() %in% sample(1:n, size = floor(0.1 * n)),
                         NA_real_, value))
# Сохраняем в CSV
write_csv(df, "data.csv")
# 2. Чтение, очистка и агрегация данных
df <- read_csv("data.csv", show_col_types = FALSE)
df_clean <- df %>%
  drop_na(value) %>%                    # удаляем пропуски
  mutate(log_value = log(value)) %>%    # создаём логарифмический признак
  group_by(category) %>%                # группировка по категориям
  summarise(mean_value = mean(value))   # среднее значение
# 3. Визуализация (ggplot2)
ggplot(df_clean, aes(x = category, y = mean_value)) +
  geom_col(fill = "steelblue") +
  labs(
    title = "Среднее значение по категориям (R)",
    y = "Среднее значение",
    x = "Категория"
  ) +
  theme_minimal()
```

Рис. 2. Очистка и агрегация данных на R

Сравнительный анализ показывает, что Python демонстрирует преимущества в интеграции предобработки с последующим машинным обучением и в масштабировании вычислений. R, в свою очередь, обеспечивает более выразительный синтаксис и удобство работы с категориальными переменными, датами и пропущенными значениями.

Классификация

Классификация является одной из наиболее востребованных задач машинного обучения и предполагает построение модели для предсказания категориальной переменной. Python располагает зрелой экосистемой, включающей scikit-learn, XGBoost, LightGBM, CatBoost, а также фреймворки глубокого обучения. Существенным преимуществом является ориентация на промышленное внедрение моделей и поддержка инструментов сериализации и мониторинга. На рис. 3 представлен пример задачи классификации на Python. Код демонстрирует генерацию синтетического набора данных (1000 наблюдений), обучение логистической регрессии, вычисление вероятностей принадлежности к классу и построение ROC-кривой с метрикой AUC.

```
from sklearn.metrics import roc_curve, auc
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.datasets import make_classification
import matplotlib.pyplot as plt
X, y = make_classification(n_samples=1000, random_state=42)
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y)
model = LogisticRegression()
model.fit(X_train, y_train)
y_prob = model.predict_proba(X_test)[:,1]
fpr, tpr, _ = roc_curve(y_test, y_prob)
roc_auc = auc(fpr, tpr)
plt.plot(fpr, tpr)
plt.title(f"ROC-кривая (Python), AUC={roc_auc:.2f}")
plt.xlabel("False Positive Rate")
plt.ylabel("True Positive Rate")
plt.show()
```

Рис. 3. Задача классификации (Python)

В R ключевыми решениями являются caret и tidymodels, обеспечивающие унифицированный доступ к широкому спектру алгоритмов. Особую роль играют обобщенные линейные модели и их расширения, традиционно развитые в статистической школе. На рис. 4 представлен пример задачи классификации на R. Код использует встроенный датасет twoClassSim() из caret (1000 наблюдений, 2 класса), разделяет данные 70/30, обучает логистическую регрессию через train() с кросс-валидацией и строит ROC-кривую с метрикой AUC через пакет pROC.

```r
# Установка пакетов (делается один раз) - закомментировано для воспроизведения
install.packages(c("caret", "pROC"))
library(caret)
library(pROC)
# Генерация данных (сбалансированные 2 класса) - ИСПРАВЛЕНО
set.seed(123)
data <- twoClassSim(1000)
# Разделение на обучающую и тестовую выборки
trainIndex <- createDataPartition(data$Class, p = 0.7, list = FALSE)
train <- data[trainIndex, ]
test  <- data[-trainIndex, ]
# Обучение логистической регрессии с кросс-валидацией
model <- train(Class ~ ., data = train, method = "glm", family = "binomial",
               trControl = trainControl(method = "cv", number = 5))
# Прогноз вероятностей для тестовой выборки
prob <- predict(model, test, type = "prob")[, 2]  # вероятность класса "Class2"
# ROC-кривая с AUC
roc_obj <- roc(test$Class, prob)
plot(roc_obj, main = "ROC-кривая (R)", print.auc = TRUE,
     col = "steelblue", lwd = 2, legacy.axes = TRUE)
grid()
```

Рис. 4. Задача классификации (R)

Сравнение показывает, что Python обладает преимуществом в задачах, требующих масштабирования и применения глубокого обучения, тогда как R обеспечивает более глубокую статистическую интерпретируемость результатов.

Кластеризация

Кластеризация представляет собой метод обучения без учителя, направленный на выявление естественных групп в данных. В Python основным инструментом является библиотека scikit-learn, предоставляющая унифицированный интерфейс для алгоритмов kmeans, DBSCAN и иерархической кластеризации. Дополнительно возможна реализация нейросетевых подходов средствами PyTorch и TensorFlow.

На рис. 5 представлен простой пример кластеризации. Код генерирует синтетический набор из 500 наблюдений с 3 центрами, обучает KMeans с n_clusters=3 и строит диаграмму рассеяния с цветовой маркировкой кластеров:

```python
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.datasets import make_blobs
import matplotlib.pyplot as plt
X, _ = make_blobs(n_samples=500, centers=3, random_state=42)
kmeans = KMeans(n_clusters=3, random_state=42)
clusters = kmeans.fit_predict(X)
plt.figure(figsize=(8,6))
plt.scatter(X[:, 0], X[:, 1], c=clusters, cmap='viridis', alpha=0.7)
plt.title("K-Means кластеризация (Python)")
plt.xlabel("Признак 1")
plt.ylabel("Признак 2")
plt.colorbar(label="Кластер")
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.show()
```

Рис. 5. Кластеризация K-Means (Python)

R обладает широким набором статистически обоснованных методов кластеризации, включая алгоритмы из базового пакета stats, а также специализированные инструменты (cluster, dbscan, factoextra). Значительное внимание уделяется визуальной диагностике качества кластеров. На рис. 6 представлена kmeans кластеризация на R и визуальная интерпретация. При-

мер кода демонстрирует генерацию синтетических данных (1000 наблюдений в 2D), применение алгоритма kmeans с 3 центрами и построение графика с цветовой маркировкой кластеров:

```r
set.seed(42)
data <- matrix(rnorm(1000), ncol=2)
kmeans_result <- kmeans(data, centers=3)
plot(data, col=kmeans_result$cluster,
     main="Kmeans кластеризация (R)")
```

Рис. 6. Kmeans кластеризация (R)

Таким образом, Python отличается стандартизацией интерфейсов и масштабируемостью, тогда как R предоставляет более разнообразные статистические методы и развитые инструменты интерпретации результатов.

Прогнозирование временных рядов

Прогнозирование временных рядов предполагает моделирование динамики показателей с учетом трендов, сезонности и стохастических компонентов. В Python применяются библиотеки statsmodels и Prophet для классических статистических моделей, а также нейросетевые архитектуры (RNN, LSTM, трансформеры) для сложных сценариев прогнозирования.

На рис. 7 рассмотрена задача прогнозирования. Код генерирует трендовый временной ряд с шумом (100 наблюдений), обучает ARIMA-модель порядка (1,1,1) и строит прогноз на 10 шагов вперед. При фиксированном random_state модель ARIMA захватывает линейный тренд, прогнозируя значения около 98–107 на горизонте 10 периодов с учетом шума.

```python
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from statsmodels.tsa.arima.model import ARIMA

ts = pd.Series([x + np.random.normal() for x in range(100)])
model = ARIMA(ts, order=(1,1,1))
result = model.fit()
forecast = result.forecast(steps=10)

plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(ts, label="Исторические данные")
plt.plot(range(100,110), forecast, label="Прогноз")
plt.legend()
plt.title("ARIMA прогноз (Python)")
plt.xlabel("Время")
plt.ylabel("Значение")
plt.grid(True)
plt.show()
```

Рис. 7. Задача прогнозирования (Python)

R традиционно считается одним из наиболее развитых инструментов статистического прогнозирования. Пакеты forecast и fable обеспечивают автоматизированный подбор моделей, построение доверительных интервалов и визуализацию результатов. Рассмотрим задачу прогнозирования на при-

мере (рис. 8). Код генерирует трендовый временной ряд из 100 наблюдений (линейный тренд 1:100 + нормальный шум), автоматически подбирает оптимальную ARIMA-модель через auto.arima() и строит прогноз на 10 шагов вперед с 95 % доверительными интервалами:

```r
library(forecast)

# Генерация трендового временного ряда
set.seed(42)
ts <- ts(rnorm(100) + 1:100)

# Автоматический подбор и обучение ARIMA модели
model <- auto.arima(ts)

# Прогноз на 10 периодов вперед с доверительными интервалами
forecast_values <- forecast(model, h=10, level=c(80, 95))

# Визуализация с доверительными интервалами
plot(forecast_values,
     main="ARIMA прогноз (R)",
     xlab="Время",
     ylab="Значение",
     col=2, lwd=2)
grid(col="gray", lty=3)
```

Рис. 8. Задача прогнозирования (R)

Следовательно, R демонстрирует преимущество в классическом статистическом анализе временных рядов, тогда как Python более эффективен при построении гибридных и нейросетевых моделей.

Обнаружение аномалий

Обнаружение аномалий направлено на выявление редких и нетипичных наблюдений в данных. В Python доступны алгоритмы Isolation Forest, One-Class SVM, а также специализированные библиотеки для работы с высокоразмерными данными и потоковыми системами.

На рис. 9 рассмотрен пример обнаружения аномалий методом Isolation Forest. Код генерирует синтетический 2D-набор из 300 нормальных наблюдений с добавлением 20 искусственных аномалий, обучает модель с уровнем контаминации 0.1 и визуализирует результаты цветовой маркировкой. Алгоритм эффективно выделяет искусственные выбросы (смещенные на +5 по обеим координатам), помечая ~10 % наблюдений как аномалии (labels=-1).

```python
from sklearn.ensemble import IsolationForest
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
X = np.random.randn(300, 2)
X[:20] += 5  # искусственные аномалии
model = IsolationForest(contamination=0.1)
labels = model.fit_predict(X)
plt.figure(figsize=(8,6))
plt.scatter(X[:,0], X[:,1], c=labels, cmap='coolwarm', alpha=0.7)
plt.title("Обнаружение аномалий (Python)")
plt.xlabel("Признак 1")
plt.ylabel("Признак 2")
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.colorbar(label="Класс (1=норма, -1=аномалия)")
plt.show()
```

Рис. 9. Обнаружение аномалий (Python)

В R реализованы статистические методы выявления выбросов и инструменты анализа аномалий во временных рядах, ориентированные на интерпретацию результатов и визуальный анализ. На рис. 10 рассмотрен пример обнаружения аномалий с использованием пакета anomalize. Код создает временной ряд из 100 наблюдений (первые 95 – нормальное распределение, последние 5 – искусственные выбросы 9-15):

```
library(anomalize)
library(tidyverse)

data <- tibble(
  date = seq(as.Date("2025-01-01"), by="day", length.out=100),
  value = c(rnorm(95), 10, 12, 15, 9, 11)
)

data %>%
  time_decompose(value) %>%
  anomalize(remainder) %>%
  plot_anomalies()
```

Рис. 10. Обнаружение аномалий (R)

Python демонстрирует преимущество в масштабируемости и работе со сложными структурами данных, тогда как R обеспечивает строгую статистическую основу и удобство аналитической диагностики.

Заключение

Выбор между Python и R не должен носить взаимоисключающий характер. Исследование показывает, что Python оптимален для интеграции моделей в бизнес-среду и работы с распределенными вычислениями. R остается незаменимым инструментом для глубоких научных изысканий, где важна доказательность и статистическая точность. Наиболее прогрессивным подходом является гибридная стратегия, объединяющая инженерную мощь Python и аналитическую глубину R.

Список используемых источников

1. Захаренков, А. О. Сравнительный анализ языков Ruby, R и Python в вопросах анализа данных на примере задачи кластеризации / А. О. Захаренков, Г. С. Евдокимова // Системы компьютерной математики и их приложения. 2020. № 21. С. 38-44.

2. Чудинова О. С. Сравнение языков программирования r и Python для анализа данных / О. С. Чудинова, А. К. Жаильбаева, Н. К. Жаильбаева // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие»: Материалы Международных научных конференций, Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2020 года. Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2020. С. 171-174.

3. Лабковская Р. Я. Анализ больших данных / Р. Я. Лабковская, П. В. Косов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора Бонч-Бруевича, 2025. 152 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PYTHON AND R IN BIG DATA PROCESSING AND ANALYSIS TASKS

Kosov P., Labkovskaya R.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In the context of digital transformation and exponential growth of information volumes, big data analysis tasks acquire strategic importance for science and business. Among the tools used for data processing and modeling, Python and R are the most widespread. Despite the similarity of application areas, these languages were formed in different scientific and applied traditions and demonstrate different advantages depending on the type of analytical task. The article provides a comparative analysis of Python and R in the context of five key areas of data analysis: preprocessing, clustering, classification, forecasting, and anomaly detection. It examines the features of ecosystems, the architectural advantages, and the limitations of each approach. big data, Python, R, machine learning, clustering, classification, forecasting, anomaly detection.

Key words: Big Data, Python, R, machine learning, clustering, classification, forecasting, anomaly detection

УДК 004.22
ГРНТИ 20.15.13

ГЕЙМИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ ЗАЯВЛЕНИЯ НА ПОВЫШЕННУЮ ГОСУДАРСТВЕННУЮ АКАДЕМИЧЕСКУЮ СТИПЕНДИЮ

А. С. Куфельд, А. А. Шиян

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается практический подход к геймификации процесса подачи заявления на повышенную государственную академическую стипендию в условиях цифровой образовательной среды вуза. В качестве основы используется действующая в СПБГУТ система балльной оценки учебной, научно-исследовательской, общественной, культурно-творческой и спортивной деятельности студентов. Предлагается модель визуального представления достижений, при которой каждому виду деятельности сопоставляется определенная виртуальная награда. Рассмотрены варианты представления данных в пользовательском интерфейсе.

геймификация, балльная система оценки, визуализация данных

Цифровая трансформация высшего образования предлагает внедрение сервисов, обеспечивающих прозрачность процессов, персонализацию взаимодействия и повышение интереса к различной деятельности у обучающихся. В рамках федерального проекта “Цифровая образовательная среда” подчеркивается необходимость развития цифровых инструментов сопровождения образовательной деятельности и создания удобных сервисов для обучающихся [1].

Процесс подачи заявления на повышенную государственную академическую стипендию (ПГАС) является формально регламентированной процедурой, основанной на накоплении студентом баллов за различную деятельность в вузе. Несмотря на объективность критериев, студенты часто воспринимают процедуру как сложную и бюрократизированную, что часто ведет к потере интереса и студента к различным мероприятиям.

Одним из эффективных инструментов повышения вовлеченности в цифровых продуктах является геймификация – внедрение игровых механик в неигровой контекст [2]. Применение данных механизмов в образовательных информационных системах позволяет повысить мотивацию и сделать взаимодействие с сервисом более интуитивным.

Целью статьи является разработка концептуальной модели геймификации процесса подачи заявления на ПГАС с описанием структуры, алгоритма функционирования и интерфейсной реализации.

Практика проектирования образовательных информационных систем показывает, что интеллектуальная обработка пользовательских данных позволяет формировать персонализированные рекомендации и повышать качество цифровых сервисов [3]. В частности, использование алгоритмической обработки входных параметров и визуализации результатов способствует более эффективному принятию решений пользователями.

Геймификация в цифровых продуктах строится на следующих принципах:

– визуализация прогресса;
– система накопления достижений;
– понятная система вознаграждения;
– обратная связь в реальном времени.

Применение данных принципов к процедуре подачи заявления на ПГАС позволяет трансформировать балльную систему в интуитивно понятную игровую модель.

В рамках предлагаемой модели каждая категория деятельности сопоставляется с определенной группой продуктов питания. Количество баллов преобразуется в «вес» продукта, численно равный начисленным баллам.

В таблице 1 приведен возможный вариант соответствия категорий деятельности и продуктов. Продукты подбирались на уровне простейших ассоциаций.

ТАБЛИЦА 1. Сопоставление видов деятельности и категорий продуктов

Вид деятельности	Игровая категория (продукты)
Учебная	Фрукты
Научно-исследовательская	Ягоды
Общественная	Овощи
Культурно-творческая	Сладости
Спортивная	Орехи

В качестве примера в таблице 2 приведена трансформация критериев учебной деятельности.

ТАБЛИЦА 1.Разбалловка учебной деятельности

Уровень достижения	Статус	Баллы	Игровой эквивалент
Университетский	Победитель	6	Груша – 6 кг
	Призер	4	Яблоко – 4 кг
Региональный	Победитель	9	Апельсин – 9 кг
	Призер	6	Груша – 6 кг
Всероссийский	Победитель	12	Персик – 12 кг
	Призер	8	Киви – 8 кг
Международный	Победитель	15	Ананас – 15 кг
	Призер	10	Манго – 10 кг

Подобная визуализация позволяет студенту воспринимать балльную систему не как абстрактные числовые показатели, а как накапливаемый «продуктовый результат».

Процесс подачи заявления же заключается в сборе продуктов в корзину и выставление ее на обозрение комиссии.

Список используемых источников

1. Федеральный проект «Цифровая образовательная среда» [Электронный ресурс]. URL: https://edu.gov.ru/national-project/projects/cos/

2. Марков Д. А. Геймификация в UI/UX-дизайне // Символ науки. 2025. № 5-1. С. 45–48. ISSN 2410-700X.

3. Католин Б. А., Ширяев С. Л., Шиян А. А. Возможности разработки и моделирования интеллектуальной информационной системы по формированию рекомендаций студентам для выбора факультативов // Проблемы образовательных процессов: материалы АПИНО 2017. 2017. С. 282–285.

GAMIFICATION OF THE APPLICATION PROCESS FOR AN ADVANCED STATE ACADEMIC SCHOLARSHIP

Kufeld A., Shiyan A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article considers a practical approach to gamification of the application process for an increased state academic scholarship in the digital educational environment of the university. The system of point assessment of educational, research, social, cultural, creative and sports activities of students is used as a basis at St. Petersburg State University. A model of visual representation of achievements is proposed, in which a specific virtual reward is assigned to each type of activity. The options of data representation in the user interface are considered.

Key words: gamification, scoring system, data visualization

УДК 004.4: 530.145
ГРНТИ 28.23.25

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПУТАННЫХ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ

В. Л. Литвинов, Ф. В. Филиппов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Исследуются модели шума и его влияние на работу квантовых схем с использованием запутанных состояний. В качестве метрик оценивания используется точность, как мера схожести состояний и мера согласованности, основанная на собственных значениях «перевернутой» матрицы Вуттерса. Показано влияние степени зашумления на надежность квантовых алгоритмов. Приводится сравнение способов оценивания влияния шума в зависимости от затрат на их реализацию.

квантовые схемы, запутанные состояния, параметризованные квантовые схемы, оптимизация параметров

Запутанность – основа большинства квантовых алгоритмов (например, квантовой телепортации). В реальных квантовых устройствах, основанных на различных технологиях (сверхпроводящие кубиты, ионные ловушки, фотонные системы) шум неизбежен: декогеренция, ошибки гейтов, утечка энергии. Без понимания влияния шума невозможно создать надежные квантовые алгоритмы.

Многие квантовые алгоритмы требуют длительного сохранения запутанности. Шум разрушает запутанность, что приводит к ошибкам в вычислениях. В работе [1] показано, что даже небольшой уровень деполяризующего шума ($p > 0.01$) приводит к экспоненциальному снижению запутанности. Настоящая работа помогает экспериментально оценить пороговые значения шума, при которых алгоритмы, использующие запутанные состояния, перестают работать.

Состояния Белла – это *максимально запутанное квантовое состояние кубитов*, которые широко используется в квантовых протоколах [2]. Например, одно из них описывается суперпозицией базовых состояний:

$$|\beta_{00}\rangle = \frac{|00\rangle+|11\rangle}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Матрица плотности этого состояния $\rho = |\beta_{00}\rangle\langle\beta_{00}|$отражает *полную корреляцию между кубитами*: измерение одного кубита мгновенно определяет состояние другого, независимо от расстояния между ними.

Точность (*fidelity*) – это мера схожести между двумя квантовыми состояниями. Для чистых состояний, таких как состояние Белла, точность определяется как квадрат модуля скалярного произведения:

$$F = \langle\beta_{00}|\rho_{ш}|\beta_{00}\rangle,$$

где $\rho_{ш}$ – матрица плотности квантового состояния после воздействия шума**.** Она описывает состояние квантовой системы, которое изначально было чистым, в нашем случае состояние Белла $|\beta_{00}\rangle$, но подверглось влиянию внешних помех, таких как деполяризующий шум, амплитудный или фазовый демпфинг. После воздействия шума состояние системы описывается матрицей плотности $\rho_{ш} = \varepsilon(\rho)$, где ε – оператор квантового шума.

В общем случае для смешанных состояний точность вычисляется через след (trace):

$$F(\rho, \rho_{ш}) = \left(Tr\sqrt{\sqrt{\rho}\rho_{ш}\sqrt{\rho}}\right)^2$$

Она принимает значения от 0 до 1, где 1 соответствует полному совпадению состояний. В наших симуляциях точность используется для оценки того, насколько состояние с шумом отклоняется от идеального состояния Белла.

Мера согласованности (*concurrence*) для двухкубитных систем определяется через собственные значения λ_i *«перевернутой»* матрицы Вуттерса $\rho(\sigma_y \otimes \sigma_y)\rho^*(\sigma_y \otimes \sigma_y)$ [3]. Concurrence вычисляется как:

$$C(\rho) = \max\left(0, \sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_3} - \sqrt{\lambda_4}\right),$$

где собственные значения λ_i упорядочены по убыванию.

Известны три модели шума: деполяризующий шум (*depolarizing noise*), амплитудный демпфинг (*amplitude damping*) и фазовый демпфинг (*phase damping*).

Деполяризующий шум – процесс, при котором кубит полностью теряет свою квантовую информацию и переходит в максимально смешанное состояние. Амплитудный демпфинг, также известный как релаксация, вызывает переход кубита из возбужденного состояния $|1\rangle$ в основное $|0\rangle$. Фазо-

вый демпфинг, или дефазировка, приводит к потере фазовой информации, но не энергии.

Деполяризующий шум моделирует полную потерю квантовой информации с вероятностью p. Этот тип шума описывается оператором:

$$\varepsilon\rho = (1-p)\rho + p\frac{I}{2},$$

где I – единичная матрица. Деполяризующий шум приводит к тому, что кубит с вероятностью p переходит в полностью смешанное состояние $I/2$, теряя всю информацию о своем начальном состоянии. В реальных квантовых системах этот шум возникает из-за взаимодействия с окружающей средой, например, тепловых флуктуаций или электромагнитных помех.

Амплитудный демпфинг моделирует *потерю энергии* кубитом, например, из-за спонтанного излучения или релаксации. Он описывается следующими операторами Крауса:

$$\varepsilon(\rho) = E_0\rho E_0^\dagger + E_1\rho E_1^\dagger, \quad (2)$$

где операторы Крауса имеют вид:

$$E_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{pmatrix}, E_1 = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{p} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь p – вероятность потери энергии (переход из $|1\rangle$ в $|0\rangle$). Кубит в возбужденном состоянии $|1\rangle$ с вероятностью p переходит в основное состояние $|0\rangle$. Этот процесс разрушает суперпозиции, так как $|1\rangle$ теряет амплитуду.

Фазовый демпфинг моделирует *потерю фазовой информации* без потери энергии. Он описывается тем же выражением (2) с той лишь разницей, что оператор Крауса E_1 приведенный в (3) имеет вид:

$$E_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{p} \end{pmatrix}.$$

Здесь p – вероятность потери фазы. Кубит в суперпозиции $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ теряет фазовую когерентность, переходя в смешанное состояние. Энергия кубита не меняется, но фазовая информация (например, относительная фаза между $|0\rangle$ и $|1\rangle$) разрушается.

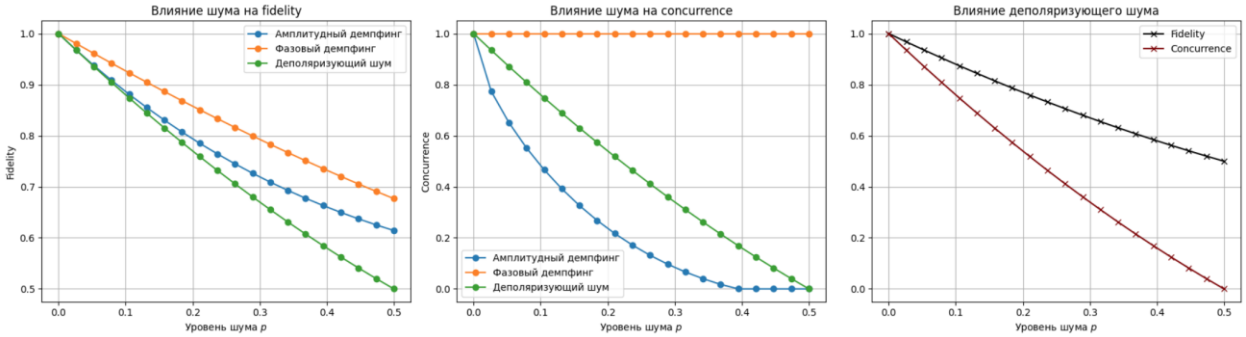


Рис. 1. Влияние различных видов шумов на точность и согласованность запутанных состояний

Один из способов моделирования различных видов шумов состоит из использования симуляторов. Например, можно использовать модели шума из библиотеки *qiskit_aer.noise* и применить их к симулятору *Aer*. В частности, эта библиотека содержит модели всех видов шумов – деполяризующий шум, шум амплитудной и фазовой демпфировки. Так, для схемы, реализующей состояние Белла (1) можно получить следующие результаты (рис. 1).

Отсюда, в частности, следует, что фазовый демпфинг не оказывает влияния на меру согласованности взаимодействующих кубитов. Действительно, *concurrence* не должна изменяться под действием фазового демпфинга, так как он влияет на фазовые соотношения внутри каждого кубита, но не изменяет корреляции между кубитами, ответственные за запутанность. Таким образом, для анализа влияния шумов на запутанность кубитов нам достаточно ограничиться вниманием к деполяризующему шуму и амплитудному демфингу.

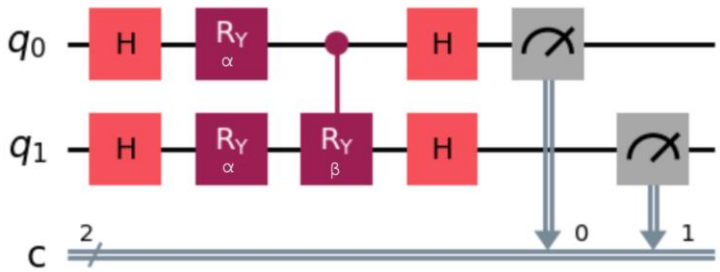


Рис. 2. Схема испытаний $U_{\alpha,\beta} = H^{\otimes 2} CR_Y(\beta)(R_Y(\alpha) \otimes R_Y(\alpha))H^{\otimes 2}$

Будем проводить анализ влияния шумов путем их имитации, используя схему рис. 2. Предлагаемая процедура имитации предполагает унитарную эволюцию оператора $U_{\alpha,\beta}$ путем пошагового изменения параметров α и β, в диапазоне от 0 до π, с шагом $\pi/100$. На каждом шаге будем выполнять измерение каждого кубита в базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Понятно, что, воздействуя та-

ким образом на векторные представления каждого кубита, мы постепенно будем наблюдать влияние «шумов» на меру согласованности.

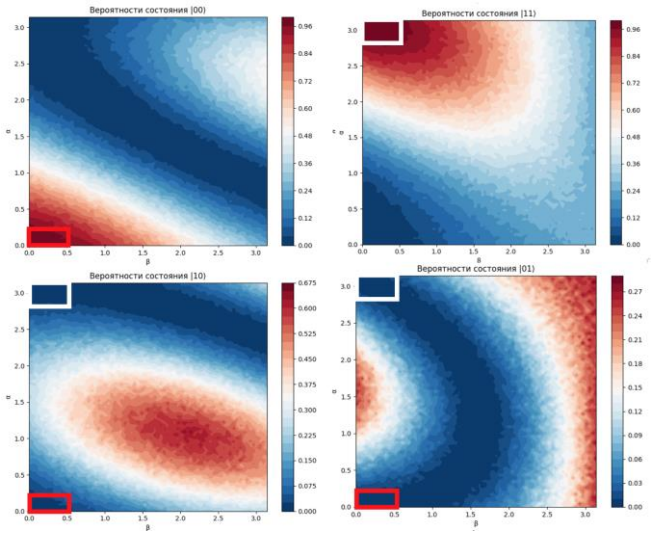


Рис. 3. Контурные графики вероятностей состояний схемы испытаний

На базе измерений в результате испытаний были получены контурные графики вероятностей (рис. 3). Верхние графики показывают вероятности состояний Белла $|\beta_{00}\rangle$ и $|\beta_{10}\rangle$, а нижние – вероятности возможных состояний схемы $|\beta_{01}\rangle$ и $|\beta_{11}\rangle$ под действием шумов.

Численная оценка влияния шума на формирование запутанных квантовых состояний может быть проведена с использованием метрик вероятности состояний. Контурные графики показывают, как изменяются эти метрики *в* зависимости от параметров α *и* β, которые можно рассматривать как углы отклонения векторов состояния кубитов, вызванные шумом (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Вероятности запутанных состояний

Уровень шума	P(|00⟩)	P(|11⟩)
0.0	0.5000	0.5000
0.1	0.5545	0.3645
0.2	0.6160	0.2560
0.3	0.6815	0.1715
0.4	0.7480	0.1080
0.5	0.8125	0.0625

В [4] показан аналитический метод оценки значений параметров α и β с использованием следующего выражения:

$$e^{i\alpha} + \left(1 + e^{i\beta}\tan\frac{\theta}{2}\right)^{n} - 1 = 0,$$

где n – число кубит, а θ изменяется в диапазоне от $2\tanh^{-1}\left(2^{\frac{1}{n}} - 1\right)$ до $\frac{\pi}{2}$. В нашем случае, при α = 0 можно выполнять оценку шума для различных n, вычисляя значения β исходя из уравнения:

$$y(\beta) = \left(1 + e^{i\beta}\tan\frac{\theta}{2}\right)^{n} = 0$$

На рис. 4 представлены графы для n = 2, 3 и 5 для различных значений θ. Оценки значений параметра β являются точками пересечения кривых на графах рис. 4 с единичной окружностью (на рисунке заполнена цветом).

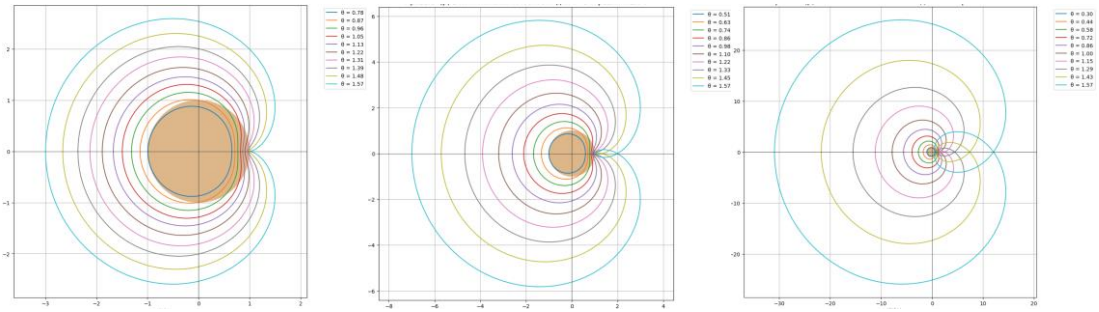


Рис. 4. Графы $y(\beta)$ для n = 2, 3 и 5 для различных значений θ

Предложенный вариант оценки влияния шумов на формирование запутанных квантовых состояний позволяет получить численные значения меры согласованности на основе метрик вероятности. Последние могут быть определены непосредственно из контурных графиков вероятности состояний схемы испытаний. Таким образом, предложенная процедура имитации позволяет экспериментально оценить пороговые значения шума, при которых алгоритмы, использующие запутанные состояния, перестают работать. Коды всех представленных результатов можно найти на ресурсе Colab [5].

Список используемых источников

1. Yang S., Yuan H., Barnes C. Experimental Demonstration of the PBR Test on a Superconducting Processor. URL: https://arxiv.org/pdf/2510.11213 (дата обращения: 16.01.2026).

2. Доронин С. И. Мера квантовой запутанности чистых состояний // Квантовая Магия, 2004. Т. 1. Вып. 1. Стр. 1123-1137.

3. Bennett C. H., DiVincenzo D. P. et al. Mixed State Entanglement and Quantum Error Correction. URL: https://arxiv.org/pdf/quant-ph/9604024 (дата обращения: 16.01.2026).

4. Pusey M. F., Barrett J., Rudolph T. On the reality of the quantum state. URL: https://arXiv:1111.3328v3 (дата обращения: 16.01.2026).

5. Оценка влияния шума. URL: https://colab.research.google.com/drive/1HNYdtk-bJakORegzlShDovpnH7mOnyk?usp=sharing (дата обращения: 16.01.2026).

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF NOISE ON THE FORMATION OF ENTANGLED QUANTUM STATES

Litvinov V., Filippov F.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Noise models and its effect on the operation of quantum circuits using entangled states are investigated. Accuracy is used as an estimation metric, as a measure of similarity of states and a measure of consistency based on the eigenvalues of the «inverted» Wootters matrix. The influence of the degree of noise on the reliability of quantum algorithms is shown. A comparison of methods for estimating the impact of noise depending on the cost of their implementation is given.

Key words: quantum circuits, entangled states, parameterized quantum circuits, parameter optimization

УДК 510.633
ГРНТИ 27.03.19

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИРКУМСКРИПЦИИ В МИНИМАЛИСТИЧНЫХ АКСИОМАТИЗАЦИЯХ ЛОГИКИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

С. А. Медведев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В аксиоматизации логики первого порядка используются схемы аксиом и правила вывода, выводящие ее в метатеорию. Однако аппарат логического вывода, хотя и решает задачу семантической фильтрации логических понятий, является слишком громоздким, если стоит только эта задача. Оба места в формализации классической логики первого порядка, где требуется обращение к метатеории, могут быть реализованы через циркумскрипцию, что позволяет создавать крайне минималистичные аксиоматизации. Обсуждаются сильные и слабые стороны таких аксиоматизаций.

логика первого порядка, Булева алгебра, кванторы, циркумскрипция

Введение

Логика первого порядка является основным инструментом доказательства теорем в современной математике с начала XX века [1]. Однако при изучении прикладных теорий аппарат логического вывода является слишком громоздким. Обучаемому требуется объяснить смысл используемых в прикладных теориях логических понятий, но аппарат, используемый для построения математических доказательств, как правило, избыточен. В то же время, необходимо избегать риска часто возникающей у студентов иллюзии, что логические понятия вводятся неформально, исключительно через примеры, и не имеют строгих определений. Однако стандартные определения из классической логики первого порядка «тянут» за собой довольно громоздкий аппарат, который предназначен для строгого вывода теорем, но для определения семантики не нужен. Еще хуже ситуация обстоит в конструктивных теориях, делающих логику менее монолитной, не позволяющей выразить максимальное количество понятий через минимальное количество примитивов [2]. В современной IT-среде много внимания уделяется рефакторингу, элегантности архитектуры, потому что когнитивные перегрузки приводят к ошибкам в работе информационных систем. Поэтому использо-

вание стандартных конструктивных теорий в качестве метатеории для прикладных теорий абсолютно неприемлемо, они нагружают обучаемых абсолютно неоправданными сложностями [3].

В то время как пропозициональная классическая логика может быть выражена с использованием строгих и наглядных формализмов, таких как таблицы истинности или диаграммы Венна, в логике первого порядка появляются кванторы, которые не могут быть определены подобным образом. Их можно относительно просто определить с использованием ε-исчисления, но ε-исчисление – это не просто переформулировка логики первого порядка, это ее консервативное расширение, добавляющее в логику оператор выбора, который уменьшает конструктивность теорий, которые в логике можно построить [4]. Таким образом, конструктивность и удобство для изучения и здесь находятся в антагонизме. Однако в конструктивных теориях есть прием, который позволяет решить данную проблему максимально элегантно.

Материалы и методы

Циркумскрипция – это метатеоретический принцип, согласно которому любой определяемый предикат должен иметь минимально возможную модель. Фактически, этот принцип гласит: если в аксиоме, описывающей предикат, не указано, в каких случаях определяемый предикат должен возвращать истину, подразумевается, что он возвращает ложь [5].

Если применить циркумскрипцию не к предикатам, а к логическим операторам, то это позволяет решить сразу две задачи, вызывающие затруднения в логических аксиоматизациях:

– определение первой логической операции, способной выразить отрицание;
– определение кванторов.

Как и правила вывода, решающие обе эти задачи в классической логике первого порядка, циркумскрипция является единым механизмом, позволяющим сделать и то, и другое. Для обозначения циркумскрипции предлагается брать символ, требующий минимальной интерпретации, в рамку, и писать его перед аксиомой, которая вводит этот символ.

$$\boxed{\theta}: \varphi[\theta]$$

Результаты

Используя циркумскрипцию как единственный метатеоретический конструкт, функционально полный базис классической пропозициональной логики можно определить всего двумя элементарными аксиомами:

$$\boxed{\bot} : \top$$

$$\boxed{\not\Rightarrow} : \top \not\Rightarrow \bot$$

Первая аксиома утверждает, что константа ⊤ всегда возвращает истину. При этом то, что она помечена как циркумскриптивная относительно символа ⊥, означает, что этот символ должен иметь минимальную интерпретацию. Иначе говоря, символ ⊥ должен возвращать ложь во всех случаях, кроме тех, в котором его вынуждает возвращать истину следующая за ним аксиома. Но эта аксиома ничего не говорит об этом символе, она содержит только символ ⊤. Поэтому символ ⊥ должен возвращать ложь всегда, что наделяет его стандартной семантикой константы «ложь».

Вторая аксиома описывает единственный случай, когда операция, обозначаемая символом ⇏, возвращает истину. Поскольку символ отмечен циркумскрипцией, он должен возвращать ложь во всех остальных случаях. Это дает таблицу истинности для классической антиимпликации, которая в сочетании с уже определенной первой аксиомой константой «истина» образует функционально полный базис для всей булевой алгебры, а значит, и для классической пропозициональной логики.

Тот же самый прием позволяет полностью определить квантор существования. В классической логике первого порядка он частично определяется следующей аксиомой:

$$\varphi[t] \Rightarrow \exists x \varphi[x] \, .$$

Эта аксиома гарантирует, что квантор существования должен возвращать истину, если найдена константа t, для которой условие ϕ выполняется. Однако при истинном консеквенте импликация всегда возвращает истину, поэтому данная аксиома не позволяет отличить квантор существования от тривиальной операции, всегда возвращающей истину. Добавим циркумскрипцию по символу ∃ в эту аксиому:

$$\boxed{\exists} : \phi[t] \Rightarrow \exists x \phi[x]$$

Теперь символ ∃ должен будет иметь минимальную интерпретацию. Это означает, что квантор существования будет возвращать истину только в том случае, если подходящий объект t найден, что исключает тривиальную тождественно истинную интерпретацию и вынуждает символ ∃ иметь стандартную семантику.

Поскольку в настоящей работе речь идет не о конструктивной, а о классической логике, квантор всеобщности можно определить через двойное отрицание квантора существования, а отрицание, в свою очередь, выражается через антиимпликацию и константу «истина».

Чтобы определить внутри теории эквиваленцию, с помощью которой можно выражать одни логические операции через другие, можно воспользоваться следующей аксиомой, не использующей циркумскрипцию:

$$(\bot \Leftrightarrow \bot) \not\Rightarrow ((\top \Leftrightarrow \bot) \Leftrightarrow (\top \Leftrightarrow \top)).$$

Эта формула, найденная с использованием специально разработанного генератора аксиом, возвращает истину, только если символ ⇔ ведет себя как классическая эквиваленция, и является семантическим фильтром. После ввода этой аксиомы можно определить остальные логические операторы так:

$$\neg\varphi \Leftrightarrow \mathrm{T} \not\Rightarrow \varphi$$
$$\varphi \Rightarrow \psi \Leftrightarrow \neg(\varphi \not\Rightarrow \psi)$$
$$\varphi \wedge \psi \Leftrightarrow \varphi \not\Rightarrow \neg\psi$$
$$\varphi \vee \psi \Leftrightarrow \neg(\neg\varphi \not\Rightarrow \psi)$$
$$\forall x\varphi \Leftrightarrow \neg\exists x\neg\varphi$$

Обсуждение

Строго говоря, сама циркумскрипция в данной аксиоматизации не является строго определенной. Аксиома, используемая для ввода антиимпликации, может иметь разную интерпретацию в зависимости от того, насколько строго понимается циркумскрипция. Поскольку эта аксиома содержит только константы, без переменных и метапеременных, можно интерпретировать ее так: операция, обозначаемая символом ⇏, возвращает истину, только если в левой части стоит константа «истина», а в правой – константа «ложь». Если на место этих констант подставить *любые* другие

формулы, операция должна возвращать ложь вне зависимости от того, что возвращают эти формулы. Очевидно, такая интерпретация неверна.

Данное обстоятельство ставит вопрос о целесообразности другого подхода к определению кванторов. Используя то же самое допущение, которое в приведенной аксиоматизации используется неявно, можно переписать аксиому для квантора существования так:

$$(\varphi[t] \Rightarrow \exists x \varphi[x]) \nRightarrow \exists x \perp.$$

Иначе говоря, аксиома гласит: «если некоторое значение *t* удовлетворяет условию ϕ, то существует x, удовлетворяющий условию ϕ, но если условие ϕ – это константа «ложь», то такого x не существует». Как и в случае с антиимпликацией, здесь неявно подразумевается, что на место константы «ложь» можно подставить любую невыполнимую формулу. Однако данное решение представляется менее удачным, чем циркумскрипция, по двум причинам:

– чисто синтаксически циркумскрипция проще – один символ в рамке против еще одной формулы с квантором и антиимпликации;
– если убрать использование циркумскрипции из определения кванторов и оставить только в пропозициональной логике, этот механизм становится одноразовым, как «чеховское ружье», которое не выстрелило. С другой стороны, для описания пропозициональной логики можно использовать таблицы истинности.

Заключение

Проведенное исследование позволяет получить крайне минималистичные аксиоматизации, которые можно использовать для быстрого ввода понятий классической логики. Однако методологически они не безупречны, поэтому их можно рекомендовать именно в качестве инструмента создания диалектической видимости [6], но не в качестве окончательных определений. Это определения, которые верны при определенной интерпретации неопределяемого символа циркумскрипции, но сам этот символ определяется нестрого. Они позволяют создать у обучаемых видимость того, что в логике все определяется строго и однозначно, оставаясь в то же время достаточно простыми, но не годятся для дисциплин, в которых логика является основным предметом изучения.

Список используемых источников

1. Mendelson E. Introduction to Mathematical Logic / E. Mendelson; 6th ed. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. 514 p. ISBN 9781032919140.

2. Brouwer L. E. J. Intuitionism and Formalism / L.E.J. Browler // Bulletin of the American Mathematical Society 20 (2). 1913. P. 81–96.

3. Фаулер, М. Рефакторинг. Улучшение проекта существующего кода / Мартин Фаулер, Кент Бек, Джон Брант, Уильям Опдайк, Дон Робертс. Пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика», 2019. 448 с.

4. Hilbert D., Bernays P. Grundlagen der Mathematik (Volume 2) / D. Hilbert, P. Bernays: Berlin: Springer. 1939. 506 p.

5. McCarthy, J. Circumscription – A form of non-monotonic reasoning / J. McCarthy // Artificial Intelligence, 13(1–2). 1980. P. 27–39.

6. Кант И. Критика чистого разума / Пер. с нем. Н. О. Лосского. М.: Наука, 1999. 655 с.

THE USE OF CIRCUMSCRIPTION IN MINIMALISTIC AXIOMATIZATIONS OF FIRST-ORDER LOGIC

Medvedev S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In the axiomatization of first-order logic, axiom schemas and inference rules are used, which lead it into a metatheory. However, the apparatus of logical inference, although it solves the problem of semantic filtering of logical concepts, is too cumbersome if this is the only task. Both places in the formalization of classical first-order logic where an appeal to metatheory is required can be realized through circumscription, which allows for the creation of extremely minimalistic axiomatizations. The strengths and weaknesses of such axiomatizations are discussed.

Key words: first-order logic, Boolean algebra, quattifiers, circumscription, attribute grammar

УДК 004.9
ГРНТИ 20.53.21

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНДИКАТОРА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

М. В. Мельников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе описывается проектирование интерактивного псевдоголографического индикатора. Устройство представляет собой куб с отражателем, установленный на управляемом микроконтроллером дисплее. Индикатор позволяет отображать динамически изменяемые элементы с эффектом объема и прозрачности. Статья раскрывает процесс создания устройства от создания концепции до практического применения индикатора. Особое внимание уделяется возможностям применения проекта в образовательной деятельности при подготовке студентов, обучающихся по профилю «Дизайн графических и пользовательских интерфейсов информационных систем», и формированию у них соответствующих компетенций.

индикатор, дисплей, микроконтроллер, представление информации, голограмма

Современный этап развития науки и техники характеризуется совершенствованием способов человеко-машинного взаимодействия. Развитие информационных технологий и перенасыщение визуальной среды делают необходимым поиск новых решений для представления информации в графическом виде.

Жидкокристаллические дисплеи, являющиеся традиционным средством отображения данных, ограничены в возможностях представления изображений с эффектом объема, глубины и прозрачности, а их применение в образовательных целях ограничено привычными формами подачи материала.

В качестве доступной альтернативы традиционным дисплеям может быть использован псевдоголографический индикатор. В отличие от голограмм, псевдоголографические устройства используют отражение и преломление света от полупрозрачных пирамидальных или кубических отражателей. Индикаторы, построенные по указанному принципу, позволяют отображать графические элементы с эффектом объема и прозрачности.

Особый интерес представляет разработка компактных псевдоголографических индикаторов. Уменьшение диагонали дисплея накладывает ряд

технических ограничений, но в то же время обеспечивает возможность использования устройства в качестве персонального настольного индикатора или учебного макета.

Разработанное устройство использует эффект отражения изображения от плоского TFT-дисплея через светоотражающую HUD-пленку, расположенную в кубе из прозрачного листового PET-пластика под углом 45 градусов к плоскости дисплея. Пользователь видит не изображение на дисплее, а его отражение в прозрачном кубе. Несмотря на простоту реализации, устройство позволяет создать эффект объема и прозрачности отображаемого изображения.

Конструктивно индикатор представляет собой настольный куб, габаритные размеры устройства – 34x50x43 мм.

Внешний вид устройства представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид устройства

Индикатор способен отображать динамически изменяемые элементы: анимированные изображения, текст, пиктограммы, элементы пользовательского интерфейса и другие объекты.

Кроме непосредственного отображения объектов, устройство обладает рядом иных функциональных возможностей, среди которых можно выделить подключение к сети Wi-Fi, получение данных о погоде и времени с удаленного веб-сервера, мониторинг температуры и влажности.

Устройство разработано на базе микроконтроллера ESP32-C3 и дисплея TFT 1.44” с разрешением 128x128 пикселей. Для мониторинга температуры и влажности используется датчик температуры и влажности SHT31.

Проект может быть использован в образовательной деятельности при подготовке студентов, обучающихся по профилю «Дизайн графических и пользовательских интерфейсов информационных систем». Его внедрение

в образовательный процесс позволяет как формировать базовые технические компетенции, так и развивать проектное мышление.

Проектная деятельность занимает важное место в подготовке студентов. Так, например, Круподерова Е. П. с соавторами указывают на то, что работа над проектом формирует навыки решения проблем творческого и поискового характера, оценки эффективности способов достижения результата и др. [1]. Обучающиеся в ходе работы участвуют в создании конкретного результата.

Студентам может быть предложена разработка визуального контента, предназначенного для отображения на голографическом индикаторе. При этом обучающимся необходимо проектировать пиктограммы, анимации и элементы пользовательского интерфейса с учетом особенностей выбранной формы представления информации (представление объема, прозрачность, угол обзора и особенности восприятия голограммы).

Относительно низкое разрешение дисплея накладывает технические ограничения на детализацию отображаемых элементов. Необходимо тщательно выбирать цветовую гамму и учитывать контрастность изображения.

Индикатор может служить основой для комплексных учебных проектов, например:

– разработка демонстрационных макетов для выставок и презентаций;
– проектирование систем мониторинга с наглядным отображением данных;
– создание интерактивных образовательных приложений.

Работа с микроконтроллером позволяет студентам на практике изучить основы устройства и программирования микроконтроллеров, а также освоить принципы сетевого взаимодействия для получения данных с удаленного сервера по Wi-Fi. Программа для микроконтроллера ESP32-C3 может быть написана в среде Arduino, что снижает сложность работы над проектом.

Проект может быть реализован в различных форматах. Так, например, студентам может быть предложено готовое устройство, для которого необходимо разработать новый визуальный стиль (набор пиктограмм, анимация заставки, тематические сцены и прочее).

Возможна работа над комплексным проектом в команде. В таком случае обучающиеся разрабатывают собственный сценарий применения индикатора и реализуют проект от анализа потребностей пользователей и работы над концепцией устройства до создания и тестирования рабочего прототипа реального устройства.

Такая работа демонстрирует владение современными инструментами дизайна, понимание технических аспектов реализации проекта, способность работать с нестандартными средствами представления информации, а также навыки проектного мышления.

Работа над проектом может быть разделена на этапы, представленные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Этапы проектирования голографического индикатора

№ п/п	Название этапа	Содержание этапа
1	Работа над концепцией устройства	Сравнительный существующих индикаторов, изучение эргономических требований, выбор аппаратной платформы
2	Проектирование аппаратной части и корпуса индикатора	3D-моделирование корпуса, изготовление призмы, подбор и компоновка электронных компонентов (микроконтроллер, дисплей, датчики, часы реального времени и др.)
3	Сборка устройства	Выполнение работ по физическому воплощению индикатора – монтаж компонентов в корпусе, сборка призмы
4	Проектирование визуального контента	Создание анимаций и графики с учетом особенностей отображения голограммы
5	Программирование микроконтроллера	Реализация функций управления дисплеем, реализация слайд-шоу, отображения показаний с датчиков, организация сетевого взаимодействия по Wi-Fi
6	Тестирование и оценка	Тестирование устройства, функциональная оценка, выработка предложений по совершенствованию индикатора

Исследователи отмечают, что интеграция голограмм как инновационных технологий в образовательный процесс обусловлена ростом значимости визуального восприятия обучающей информации и степени вовлеченности обучающихся. Голографические технологии могут сделать процесс обучения более увлекательным, эффективным и доступным [2].

Примером успешного применения голограмм в образовании является разработанная группой исследователей система HoloBoard [3] – широкоформатная учебная голографическая система отображения информации.

Работа над псевдоголографическим индикатором позволяет студентам освоить ключевые принципы голографических технологий на доступном

и компактном устройстве. Устройство демонстрирует базовые оптические принципы голографии в упрощенном виде и позволяет приобрести навыки проектирования визуального контента для голографических сред.

Освоенные в ходе работы над проектом принципы применимы к более сложным голографическим системам.

Подводя итоги, отметим, что спроектированный псевдоголографический индикатор позволяет отображать динамически изменяемые элементы с эффектом объема и прозрачности.

Разработанное устройство может быть применено в образовательной деятельности при подготовке студентов.

Студенты могут работать как над созданием визуального контента для миниатюрного индикатора, так и реализовывать комплексный проект – от анализа потребностей пользователя до проектирования, сборки и тестирования готового прототипа реального устройства.

Список используемых источников

1. Круподерова Е. П. Круподерова К. Р., Савина К. С. Организация проектной деятельности студентов в рамках цифровой образовательной среды ОПОП // Проблемы современного педагогического образования. 2021. N 70-2. С. 111-114.

2. Salloum, Said A. et al. Adoption of 3D Holograms in Science Education: Transforming Learning Environments // IEEE Access. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3402549.

3. Gong, Jiangtao et al. HoloBoard: a Large-format Immersive Teaching Board based on Pseudo HoloGraphics // The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST ’24). New York, NY, USA: ACM, 2024. P. 441–456. ISBN 978-1-4503-8635-7.

Статья представлена заведующим кафедры ИКД СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Д. В. Волошиновым.

DESIGNING AN INTERACTIVE HOLOGRAPHIC INDICATOR BASED ON A MICROCONTROLLER

Melnikov M.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper describes the design of an interactive pseudo-holographic indicator. The device is a cube with a reflector mounted on a microcontroller-controlled display. The indicator allows you to display dynamically resizable elements with the effect of volume and transparency. The article reveals the process of creating the device from the creation of the concept to the practical application of the indicator. Special attention is paid to the possibilities of applying the project in educational activities in the preparation of students studying in the field of «Design of graphic and user interfaces of information systems», and the formation of their respective competencies.

Key words: indicator, display, microcontroller, information representation, hologram

УДК 004.7:004.422.8
ГРНТИ 28.29.01

АКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ ПОДДЕРЖКИ СЕРВИСОВ URLLC В СЕТЯХ 5G

Н. Н. Мошак, Н. Эль Сабаяр Шевченко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Сервисы класса URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) играют важную роль в сетях пятого поколения (5G), обеспечивая поддержку приложений с повышенными требованиями к надежности и задержкам передачи данных. Реализация таких сервисов в условиях неоднородной нагрузки и ограниченных ресурсов сети требует применения новых подходов к организации и управлению сетевой инфраструктурой. В статье рассматриваются актуальные подходы к поддержке сервисов URLLC в сетях 5G, направленные на повышение эффективности функционирования сети и обеспечение требуемых показателей качества обслуживания. Отмечается роль интеллектуальных механизмов управления в адаптации сетевых процессов к изменяющимся условиям эксплуатации и требованиям обслуживаемых сервисов.

5G, URLLC, сетевые срезы, граничные вычисления, машинное обучение, QoS

Сети пятого поколения (5G) обеспечивают поддержку трех основных классов сервисов: улучшенной мобильной широкополосной связи (eMBB), массовых межмашинных коммуникаций (mMTC) и сверхнадежных коммуникаций с низкой задержкой (URLLC). Последний из них ориентирован на приложения, требующие высокой надежности доставки сообщений при сохранении минимальных. Фундаментальные принципы построения сетей 5G и особенности реализации различных сервисов подробно рассмотрены в работе [1]. К сервисам URLLC относятся промышленная автоматизация, системы беспилотного транспорта, удаленное управление технологическими процессами и телемедицина. Для данных сервисов критическое значение имеет время доставки команды от управляющего устройства до исполнительного механизма, а также гарантия отсутствия потерь информации в канале связи.

Требования к задержкам и надежности для URLLC существенно отличаются от требований сервисов массового доступа к сети, таких как просмотр веб-страниц или потоковое видео. Анализ современных подходов к обеспечению качества обслуживания в сетях с коммутацией пакетов пред-

ставлен в [2]. В связи с этим возникает необходимость в разработке и внедрении специализированных механизмов поддержки данного класса трафика в сети 5G.

Обеспечение низкой задержки и высокой надежности в беспроводных сетях сопряжено с рядом технических ограничений. Традиционные методы повышения надежности основаны на использовании механизмов подтверждения приема и повторной передачи утерянных пакетов. Применение данных методов приводит к увеличению времени доставки информации, что вступает в противоречие с требованиями URLLC. Анализ механизмов управления качеством обслуживания и возникающих при этом ограничений выполнен в [2].

Состояние беспроводного канала связи подвержено изменениям под воздействием внешних факторов: перемещения объектов, погодных условий, электромагнитных помех от работающего оборудования. Данные факторы влияют на вероятность возникновения помех при передаче. Дополнительную сложность создает необходимость совместной передачи в одной сети трафика различных типов. Сервисы с высокими требованиями к пропускной способности (например, видеотрансляции) и сервисы с высокими требованиями к задержкам (URLLC) используют общий частотный ресурс. Возникает задача распределения этого ресурса между разными типами трафика с учетом их приоритетов. Архитектурные аспекты построения сетей и принципы организации передачи данных рассмотрены в [3].

Механизмы физического уровня для поддержки URLLC сервисов

В отличие от предыдущих поколений связи, где устройство ожидало фиксированного временного интервала для начала передачи, в 5G предусмотрена возможность отправки данных малыми порциями практически сразу после их появления благодаря гибкой структуре кадра.

Для устройств, работающих в режиме URLLC, может применяться механизм резервирования ресурсов. При этом сеть однократно выделяет устройству периодически повторяющиеся временные интервалы для передачи. В отличие от стандартного режима, где перед каждой передачей требуется отправить запрос и дождаться ответа, устройство URLLC передает данные в заранее выделенных интервалах без дополнительных запросов, что исключает задержки, связанные с процедурой планирования.

Для повышения надежности передачи применяются методы пространственного и частотного разнесения. Информация может дублироваться

и передаваться одновременно по нескольким независимым каналам или через несколько антенн. При ухудшении условий на одном из путей передачи данные успешно доставляются по альтернативному пути.

Интеллектуальные подходы к управлению радиоресурсами 5G

Для эффективного использования имеющихся механизмов снижения задержек целесообразно применять интеллектуальные подходы к управлению сетевыми ресурсами, основанные на методах машинного обучения и прогнозирования.

Одним из направлений является прогнозирование состояния канала связи. На основе анализа исторических данных о качестве соединения, времени суток, местоположении абонента и характере его перемещения алгоритмы машинного обучения способны с определенной точностью предсказывать моменты ухудшения условий передачи. Полученный прогноз позволяет сети заблаговременно адаптировать параметры передачи: изменить схему модуляции, увеличить мощность сигнала или переключить абонента на более устойчивый канал. Данные меры направлены на предотвращение потерь пакетов, а не на исправление последствий потерь.

Другим направлением является интеллектуальное планирование ресурсов при совместной передаче трафика разных классов. В условиях дефицита ресурсов планировщик базовой станции принимает решение о приоритетном обслуживании URLLC-трафика. При поступлении высокоприоритетного пакета URLLC планировщик может временно приостановить передачу низкоприоритетного трафика (например, eMBB) и выделить освободившиеся ресурсы для срочной доставки URLLC-пакета. Интеллектуальные алгоритмы призваны минимизировать влияние вытеснения на качество восприятия низкоприоритетных сервисов, выбирая для приостановки те фрагменты данных, потеря которых наименее критична для пользователя. Моделирование задержек в сетях 5G и анализ факторов, влияющих на время доставки пакетов, представлены в [4].

Архитектурные решения для поддержки URLLC сервисов

Помимо оптимизации на уровне радиодоступа, поддержка URLLC обеспечивается архитектурными решениями на уровне ядра сети и инфраструктуры.

Технология сетевых срезов (network slicing) позволяет создавать виртуальные изолированные сети с гарантированными параметрами качества об-

служивания. Для приложений URLLC может быть выделен отдельный сетевой срез, в пределах которого обеспечивается приоритетная обработка трафика, резервирование ресурсов и выполнение требований по задержкам независимо от загрузки других сегментов сети оператора. Вопросы реализации сетевых срезов и задачи их поддержки в радиодоступе проанализированы в [5].

Технология граничных вычислений (MEC – Multi-access Edge Computing) предполагает размещение вычислительных мощностей и серверов приложений на периферии сети, в непосредственной близости от базовых станций. При обработке данных на границе сети сокращается время прохождения сигнала по магистральным каналам связи. Для сервисов URLLC, критичных к задержкам, приближение вычислительных ресурсов к месту генерации трафика является обязательным условием выполнения требований по времени доставки информации.

Заключение

В статье рассмотрены основные подходы к поддержке сервисов URLLC в сетях 5G. Обеспечение сверхнизких задержек и высокой надежности передачи требует комплексного применения решений различных уровней, в частности интеллектуальных алгоритмов планирования радиоресурсов, а также сетевых срезов и граничных вычислений на архитектурном уровне. Развитие сервисов URLLC в сетях следующих поколений предполагает применение методов искусственного интеллекта для динамической адаптации механизмов обеспечения надежности к условиям канала, типу трафика и требованиям QoS.

Список используемых источников

1. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: Fundamentals // Academic Press, 2021. 466 p.

2. Мошак Н. Н. механизмы обеспечения QoS в сети LTE / Н. Н. Мошак, Г. Д. Харитонов // Региональная информатика (РИ-2020): XVII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции, Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 года. Часть 2. Санкт-Петербург: Региональная общественная организация «Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления», 2020. С. 296-297.

3. Мошак Н. Н. Особенности архитектуры сети LTE // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIII международной научной конференции, в 2 ч. Санкт-Петербург, 2020. С. 320-330.

4. Fattah, S., et al. “End-to-End Latency in 5G Networks: Analysis and Modeling.” IEEE Internet of Things Journal. Vol. 8. N 4, 2021. PP. 2602–2615. DOI:10.1109/JIOT.2020.3016346.

5. Смирнов А. П., Киреев С. В. Сетевые срезы в 5G и задачи их поддержки в радиодоступе. Инфокоммуникационные технологии, 2021. № 8. С. 44–50.

CURRENT APPROACHES TO SUPPORTING URLLC SERVICES IN 5G NETWORKS

Moshak N., El Zabayar Shevchenco N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) services play a crucial role in fifth-generation (5G) networks, supporting applications with stringent requirements for reliability and data transmission latency. The implementation of such services under conditions of heterogeneous traffic loads and limited network resources necessitates new approaches to the organization and management of network infrastructure. This paper examines current approaches to supporting URLLC services in 5G networks aimed at improving network efficiency and ensuring the required Quality of Service (QoS) metrics. The role of intelligent control mechanisms in adapting network processes to dynamic operating conditions and the specific requirements of the supported services is highlighted.

Key words: 5G network, URLLC, network slicing, edge computing, machine learning, QoS

УДК 331.445
ГРНТИ 20.19.21

УПРАВЛЕНИЕ ПОРТФЕЛЕМ СТУДЕНЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ GOOGLE SHEETS

Г. Н. Смородин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Изложены основные составляющие импровизированной системы управления портфелем студенческих проектов в области информационных технологий. В основу построения системы положен табличный процессор корпорации Google. Выделены вкладки для сравнительного анализа текущего состояния проектов, вкладки по учебным группам для фиксации индивидуальных достижений, вкладка для организации встреч с командами и представления основных планируемых результатов каждого из проектов. Предлагаемая система позволяет актуализировать и контролировать текущее состояние проектов и вести мониторинг как командных, так и индивидуальных достижений членов команды.

проектная деятельность, информационные технологии, студенческие проекты, инструменты управления портфелем проектов

Студенческие проекты в значительной степени отличаются от проектов коммерческих. Финансовая составляющая у них, как правило, отсутствует, что создает ложное впечатление о простоте системы управления портфелем проектов (СУПП). В действительности, реализуя студенческий (по сути дела образовательный) проект нельзя ограничиваться только стремлением к достижению цели проекта в заданное время и при ограниченных ресурсах. Не менее, а возможно и более важной компонентой является формирование требуемых компетенций у членов команды. Это предполагает применение дополнительных метрик, направленных на анализ и оценку индивидуальных достижений членов команды [1].

Pro et contra

Нахождение баланса между необходимыми и достаточными метриками приводит к заключению, что СУПП должна быть достаточно гибкой, чтобы учитывать особенности учебного процесса в конкретном универси-

тете [2, 3], особенности самих проектов, программ проектов (при их наличии) и особенности взаимодействия с каждой их команд.

В качестве первого приближения можно рекомендовать использовать такие вкладки табличного процесса как Текущее состояние портфеля проектов, Расписание встреч с командой и Списки студентов по учебным группам. Длинные названия вкладок неудобны, особенно при использовании СУПП на устройствах с небольшим экраном, поэтому рекомендуется использовать сокращения.

Вкладка «%»

Название ассоциируется с основным назначением данной вкладки – еженедельной фиксацией выполненной доли всего объема проекта, выраженной в процентах (рис.1). В дальнейшем данная вкладка может найти применение и для фиксации планируемых результатов проектной деятельности (получение минимально жизнеспособного продукта (MVP – Minimum Viable Product), публикация статей в журналах и участие в конференциях).

Заявки на весенний семестр	MVP	Конференция участие и/или публикация в сборнике статей	Научная статья в журнале	1 10.02	2 17.02	3 24.02
Нужны	Планируем	Не планируем	Не планируем	0	0	0
Не нужны	Планируем	2 конферен…	2 статьи	0	5	5
Не нужны	Планируем	Не планируем	Не планируем	0	0	0
Не нужны	Не плани…	1 конферен…	2 статьи	0	3	3

Рис. 1. Фрагмент вкладки «%»

Вкладка Митапы

Митапы (от английского meet up) на сленге ИТ-разработчиков означают встречи для обсуждения промежуточных результатов проекта и распределения активностей на ближайшее время. Вкладка позволяет планировать встречи куратора как с тимлидом, так и со всеми членами команды. Для выбора времени встречи используется выпадающее меню с детализацией по 30 минут.

Помимо времени встречи команда может выбрать также и ее формат – в аудитории (onsite) или дистанционно (online). Дистанционные встречи мо-

гут быть востребованы при реализации индустриальных проектов – проектов, предложенных внешними организациями (рис. 2).

Заявки на весенний семестр	MVP	Конференция участие и/или публикация в сборнике статей	Научная статья в журнале	1 10.02	2 17.02	3 24.02
Нужны	Планируем	Не планируем	Не планируем	0	0	0
Не нужны	Планируем	2 конферен…	2 статьи	0	5	5
Не нужны	Планируем	Не планируем	Не планируем	0	0	0
Не нужны	Не плани…	1 конферен…	2 статьи	0	3	3

Рис. 2. Фрагмент вкладки Митапы

Заключение

Анализ особенностей управления портфелем студенческих проектов показал, что на начальной стадии внедрения в учебный процесс модулей (курсов) обучения на проектной основе, для построения решения по управлению портфелем проектов можно использовать облачный табличный процессор.

Общедоступная реализация такого процессора компанией Google позволяет при минимальных временных затратах воссоздать диалог между заказчиком, куратором, менеджерами проектов, тимлидами и членами студенческих команд, вести трассировку промежуточных результатов, учитывать не только командные, но и индивидуальные достижения разработчиков и, по завершении учебного курса, получить в первом приближении оценку индивидуального вклада каждого члена команды в формирование результатов проектной деятельности и оценку сформированности компетенций.

В качестве развития данной импровизированной СУПП можно рекомендовать постепенный переход к разделению хранения данных и доступа к ним на основе дашборда [4], что способно повысить качество управления портфелем проектов и повысить наглядность проведения учебного процесса на основе проектного подхода.

Список используемых источников

1. Supriatiningtyas N., Maulida S. A., Sucipto S. Project-Based Learning with Google Spreadsheets: An Effective Approach to Improving Student Learning Interest and Collaboration // Jurnal Paedagogy. 2025. Т. 12. № 3. С. 938-946.

2. Рубан Е. А. использование Google Таблиц для контроля качества учебного процесса / Е. А. Рубан, Г. Н. Смородин, А. Г. Смородина // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 1553-1556. EDN: TPSPZF.

3. Смородин Г. Н. Применение Google таблиц в качестве интерактивного журнала активности студентов / Г. Н. Смородин, К. С. Чуприна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): Сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 2023 года / Под редакцией С. И. Макаренко, сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. Том 4. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2023. С. 514-518. EDN: YWQOFU.

4. Дзенаускас И. Д. Решение задачи сбора данных из динамически изменяющегося файлового хранилища в рамках экосистемы Google / И. Д. Дзенаускас, Г. Н. Смородин // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2025 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. С. 208-210. EDN: EWEEIK.

STUDENT PROJECT PORTFOLIO MANAGEMENT BASED ON GOOGLE SHEETS

Smorodin G.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The main components of an improvised system for managing a portfolio of student projects in the field of information technology are stated. The system is based on the spreadsheet processor of Google Corporation. There are tabs for a comparative analysis of the current state of projects, tabs for training groups for recording individual achievements, a tab for organizing meetings with teams and presenting the main planned results of each of the projects. The proposed system allows you to update and control the current state of projects and monitor both team and individual achievements of team members.

Key words: project activities, information technology, student projects, project portfolio management tools

КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 004.056
ГРНТИ 81.93.29

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫМИ ИНЦИДЕНТАМИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В. С. Авраменко, В. Б. Цыпнятов

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены российские и зарубежные стандарты по управлению компьютерными инцидентами в инфокоммуникационных системах. Проанализированы основные стадии и функции управления компьютерными инцидентами, реализуемые организационные и технические мероприятия. Сформулированы недостатки и основные проблемные вопросы существующего подхода к управлению компьютерными инцидентами в инфокоммуникационных системах и причины их возникновения, предложены направления повышения эффективности управления компьютерными инцидентами.

инфокоммуникационная система, компьютерный инцидент, управление, реагирование, автоматизация, машинное обучение

В настоящее время обострение проблем защиты информации в инфокоммуникационных системах (ИКС) в первую очередь обусловлено активным развитием средств и технологий реализации компьютерных атак на ИКС, в том числе и с использованием технологий искусственного интеллекта [1], а также активизацией деятельности специальных служб и подразделений недружественных государств.

Одной из ключевых задач защиты информации в ИКС является управление компьютерными инцидентами.

Под компьютерным инцидентом (КИ) понимается факт нарушения и (или) прекращения функционирования информационного ресурса, сети электросвязи, используемой для организации взаимодействия информационных ресурсов, и (или) нарушения безопасности обрабатываемой в инфор-

мационном ресурсе информации, в том числе произошедший в результате компьютерной атаки [2].

Для объектов информационной инфраструктуры за последние годы в России разработан ряд федеральных и ведомственных нормативно-правовых документов, регламентирующих мероприятия по реагированию на компьютерные инциденты. В частности, данному вопросу посвящена серия стандартов «Управление компьютерными инцидентами» в рамках функционирования государственной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак на информационные ресурсы Российской Федерации, объектами которой являются и ИКС, относящиеся к объектам критической инфраструктуры.

В соответствии с действующими отечественными стандартами по управлению компьютерными инцидентами структурированный подход к организации и ведению деятельности по управлению компьютерными инцидентами включает в себя четыре стадии:

– организация деятельности по управлению компьютерными инцидентами;
– обнаружение и регистрация компьютерных инцидентов;
– реагирование на компьютерные инциденты (включая фиксацию материалов, связанных с возникновением компьютерных инцидентов и установление причин и условий возникновения компьютерных инцидентов);
– анализ результатов деятельности по управлению компьютерными инцидентами.

Стадия непосредственного реагирования включает следующие мероприятия:

– определение вовлеченных в компьютерный инцидент элементов информационной инфраструктуры;
– локализация компьютерного инцидента;
– выявление последствий компьютерного инцидента;
– ликвидация последствий компьютерного инцидента;
– закрытие компьютерного инцидента.

Из зарубежных нормативных документов по вопросам регулирования управления компьютерными инцидентами следует выделить выпущенный в США в 2025 году стандарт NIST (National Information Standardization Institute) SP 800-61 Rev. 3 «Incident Response Recommendations and Considerations for Cybersecurity Risk Management: A CSF 2.0 Community Profile» – Рекомендации и соображения по реагированию на инциденты для

управления рисками в сфере кибербезопасности: профиль сообщества CSF 2.0.

В данном документе выделяется шесть основных функций: Govern (управление); Identify (идентификация); Protect (защита); Detect (обнаружение); Respond (реагирование); Recover (восстановление). В отличие от предыдущей версии, стандарт SP 800-61 Rev. 3 ориентирует на параллельное выполнение отдельных функций и задач по реагированию.

Рост количества компьютерных инцидентов в типовых ИКС свидетельствует о том, что сложившийся в настоящее время подход к управлению КИ на основе отечественных стандартов не в полной мере обеспечивает требуемый уровень защищенности информации в условиях высокоинтенсивных атак. В первую очередь это обусловлено тем, что в условиях высокой интенсивности компьютерных инцидентов применяемый последовательный подход к выполнению этапов обработки инцидента в рамках существующей системы управления КИ уже не позволяет обеспечить своевременное реагирование.

К основным проблемным вопросам существующего подхода к управлению КИ в первую очередь следует отнести недостаточно высокую результативность и оперативность выполнения таких мероприятий как обнаружение КИ; локализация; установление причин и условий возникновения КИ (анализ, диагностирование КИ); выявление последствий КИ; разработка рекомендаций по устранению причин КИ; оценка эффективности реагирования.

К основными причинам сложившейся проблемной ситуации можно отнести следующие:

– Во-первых, существующий подход к управлению КИ ориентирован на последовательное выполнение задач управления КИ, что не всегда позволяет своевременно обеспечить требуемый уровень защищенности информации в условиях массированных, разнородных и ранее неизвестных компьютерных атак в сложных ИКС.
– Во-вторых, ряд ключевых мероприятий по реагированию главным образом выполняется в «ручном» режиме, что занимает недопустимо длительное время, приводит к ошибкам как при выработке и принятии решений, так и в ходе их реализации.

Особенно критичны данные недостатки в условиях высокой степени неопределенности априорной информации об компьютерных атаках, в первую очередь – в условиях реализации атак «нулевого дня».

Одним из направлений повышения эффективности управления КИ в ИКС следует считать переход на последовательно-параллельное выполне-

ние мероприятий по управлению КИ и улучшение взаимодействия и координации с другими службами и подразделениями ИКС с целью повышения оперативности управления. В частности, результаты анализа (диагностирования) КИ могут сразу направляться не только в подсистему непосредственного реагирования, но и в подсистему обнаружения КИ для ее совершенствования.

Также по результатам анализа (диагностирования) инцидента могут проводиться мероприятия по совершенствованию организации управления КИ, организации функционирования ИКС в целом.

Другим направлением повышения эффективности управления КИ в ИКС является повышение уровня автоматизации функций и задач защиты информации в ИКС [4], основными из которых являются следующие:

– обнаружение и диагностирование КИ;
– выявление последствий КИ;
– поддержка принятия решений на мероприятия реагирования;
– сбор и обобщение информации о КИ и мероприятиях по реагированию на них;
– оценка эффективности управления реагированием;
– распространение инструкций, рекомендаций и успешных практик по реагированию.

В свою очередь, перспективным путем автоматизации решения сложных функций и задач управления КИ, связанных с обработкой большого объема разнородных данных, является применение технологий машинного обучения [3]. В частности, предложенная в [4] методика диагностирования компьютерных инцидентов на основе искусственных нейронных сетей позволяет в близком к реальному масштабу времени и с достаточно высокой достоверностью определять причины и условия возникновения КИ.

Также технологии искусственного интеллекта могут быть использованы для поддержки принятия решений по мероприятиям реагирования (интеллектуального помощника), обобщения, визуализации и оценки результатов реагирования [5, 6].

Таким образом, эффективное управление КИ в ИКС в современных условиях функционирования предполагает максимальное распараллеливание функций и задач, усиление взаимодействия между службой безопасности и IT-службой, автоматизацию основных функций и задач реагирования на основе использования современных информационных технологий.

Список используемых источников

1. Намиот Д. Е., Ильюшин Е. А., Чижов И. В. Искусственный интеллект и кибербезопасность // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 9. С. 135-147.

2. ГОСТ Р 59709–2022. Защита информации. Управление компьютерными инцидентами. Термины и определения. М.: РИС, 2022.

3. Авраменко В. С., Маликов А. В. Диагностирование компьютерных инцидентов безопасности на основе комбинированной искусственной нейронной сети // Защита информации. Инсайд. 2019. № 6(90). С. 72-76.

4. Авраменко В. С. Направления автоматизации защиты информации в инфокоммуникационных системах // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025): Материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 29–31 октября 2025 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2025. С. 139-140.

5. Саяркин Л. А., Шамиев В. А., Паращук И. Б. Некоторые аспекты и перспективы управления событиями и инцидентами безопасности с целью обнаружения и предупреждения кибератак на современные электронные образовательные ресурсы для подготовки инженерных кадров // Современные тенденции инженерного образования: материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 04 декабря 2024 года. СПб: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2025. С. 66-70.

6. Ковалев И. С., Паращук И. Б. Яровой Р. В. Основные направления и потенциальные проблемы использования компьютерного зрения для обеспечения защищенности и повышения качества управления современными инфокоммуникационными // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 440-444.

PROBLEMATIC ISSUES OF COMPUTER INCIDENT MANAGEMENT IN INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS

Avramenko V., Tsypnyatov V.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

Russian and foreign standards for managing computer incidents in information and communication systems are considered. The main stages and functions of computer incident management, as well as the organizational and technical measures implemented, are analyzed. The shortcomings and main problematic issues of the existing approach to managing computer incidents in information and communication systems and the causes of their occurrence are formulated, and directions for improving the efficiency of computer incident management are proposed.

Key words: infocommunication system, computer incident, management, response, automation, machine learning

УДК 004.056
ГРНТИ 81.93.29

ПОДХОД К УПРЕЖДАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В. С. Авраменко

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрена проблема контроля защищенности информации в инфокоммуникационных системах в современных условиях функционирования, обоснована необходимость реализации упреждающего контроля защищенности в критически важных инфокоммуникационных системах. Сформулированы назначение, роль и место функции контроля защищенности информации в инфокоммуникационных системах с позиций теории управления. Приведена формальная постановка задачи упреждающего контроля защищенности информации. Выделены основные уровни упреждающего контроля защищенности информации в инфокоммуникационных системах.

инфокоммуникационная система, защищенность информации, контроль защищенности, прогнозирование, показатели эффективности контроля

Проблема защиты информации в инфокоммуникационных системах (ИКС) относится к классу регулярных. В настоящее время ее обострение в основном обусловлено повышением качества целенаправленных компьютерных атак на фоне текущей геополитической ситуации, в первую очередь – в отношении ИКС, относящихся к объектам критической инфраструктуры. В связи с этим возникает необходимость повышения эффективности выполнения основных функций и задач защиты, в том числе и контроля защищенности информации в ИКС.

Основным недостатком существующих походов к контролю защищенности информации в ИКС является ориентация на периодическую проверку отдельных элементов системы защиты и оценку текущего состояния защиты, в то время как современные условия функционирования в ИКС требуют реализации постоянного упреждающего контроля защищенности, обеспечивающего возможность предотвращения как отдельных нарушений безопасности информации, так и возможного нарушения защищенного состояния информации в ИКС в целом.

С позиций системного подхода под защищенностью информации в ИКС понимается свойство ИКС противостоять созданию и реализациям

угроз безопасности информации. Данное свойство реализует система защиты информации ИКС.

Под контролем защищенности информации в ИКС понимается проверка соответствия текущего состояния системы защиты требуемому. Требуемое состояние в общем случае задается в виде требований к значениям показателей защищенности информации.

Система контроля защищенности информации в ИКС – совокупность средств контроля защищенности информации, исполнителей и объектов контроля, взаимодействующих в соответствии с принятой политикой безопасности (планом защиты информации).

Следует отметить, что существуют различные варианты трактовок понятия «контроль защищенности». В частности, в соответствии с [1] задача контроля защищенности информации в основном направленна на поиск уязвимостей, проверку состава и настроек средств защиты информации. Также контроль защищенности рассматривается, как задача мониторинга информационной безопасности [2].

С позиций теории управления контроль защищенности является функцией управления защитой информации, которая выполняется на основе результатов выполнения функций сбора и учета информации о состоянии защиты. При обнаружении недопустимых отклонений текущего состояния защиты от требуемого проводится анализ причин отклонения, выполняются мероприятия по восстановлению требуемого уровня защищенности информации в рамках функции оперативного управления или планирования.

Таким образом, контроль защищенности информации в ИКС в общем случае представляет собой процесс сбора и анализа информации о состоянии системы защиты с целью своевременного обнаружения и предпосылок, и фактов перехода информации в незащищенное состояние.

Эффективность контроля защищенности во многом определяет эффективность управления защитой, соответственно – эффективность зашиты информации в ИКС. В условиях высокой степени неопределенности угроз безопасности информации, масштаба и динамики их реализации, характерных для современных условий функционирования критически важных ИКС, необходимо стремиться к реализации стратегии упреждающей защиты, направленной на предотвращение нарушений защищенного состояния информации.

В общем случае упреждающая защита предполагает реализацию функции прогнозирования защищенности информации [3]. В теории управления

функция прогнозирования рассматривается, как самостоятельная либо выделяется в качестве этапа реализации других управленческой функций, в частности – функции контроля.

Предлагаемый подход к упреждающему контролю защищенности информации основан на включение функции прогнозирования в состав функции контроля.

Постановка задачи упреждающего контроля защищенности информации в ИКС в общем виде формулируется следующим образом.

Дано:

1. Требования к защищенности информации. Требования в общем случае могут задаваться в виде требуемого значения показателя защищенности с указанием интервала (области) допустимых отклонений $\Delta\vec{Y}_{\text{защ тр}}$.

2. Требования к показателям эффективности контроля защищенности $\Delta\vec{Y}_{\text{защ тр}}$. Основными являются требования по достоверности, оперативности и ресурсоемкости контроля.

Требуется:

Разработать совокупность мероприятий контроля, позволяющих с заданными требованиями $\Delta\vec{Y}_{\text{защ тр}}$ обнаруживать и прогнозировать недопустимые отклонения показателя защищенности информации в АС $\Delta\vec{Y}_{\text{защ тр}}$: $\vec{Y}_{\text{кз}}(\Delta\vec{Y}_{\text{защ тр}}) \geq \vec{Y}_{\text{кз тр}}(\Delta\vec{Y}_{\text{защ тр}})$.

Можно выделить следующие уровни реализации упреждающего контроля защищенности:

– уровень контроля текущего и прогнозного уровня защищенности информации в ИКС в целом;
– уровень контроля состояния и функционирования элементов системы защиты информации (сканирование на предмет наличия уязвимостей, тестирование, обнаружение аномалий, моделирование и прогнозирование отдельных компьютерных атак и др.).

Результаты контроля на уровне средств защиты используются для контроля уровня защищенности информации ИКС, но некоторые предпосылки отдельных нарушений безопасности могут напрямую свидетельствовать о возможном нарушении защищенного состояния информации в ИКС в целом.

Таким образом, реализация упреждающего контроля защищенности информации позволит обеспечить упреждающую защиту (предотвратить

возможность перехода информации в ИКС в незащищенное состояние), существенно повысить эффективность защиты в ИКС в целом.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2021. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. М.: РИС, 2021.

2. Паращук И. Б. Владимирова Е. С., Саяркин Л. А. Классификационные признаки процедур мониторинга защищенности программно-аппаратных комплексов электронного документооборота, использующих каналы инфокоммуникационных сетей // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025). Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. СПб: СПбГУТ, 2025. С. 305-309.

3. Авраменко В. С., Орлов А. С. Прогнозирование защищенности информации в автоматизированных системах на основе методов машинного обучения // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025): Материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 29–31 октября 2025 года. СПб: СПОИСУ, 2025. С. 141-142.

APPROACH TO PREVENTIVE CONTROL OF INFORMATION SECURITY IN INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS

Avramenko V.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

The article considers the problem of information security control in infocommunication systems in modern operating conditions and substantiates the need for proactive information security control in critical infocommunication systems. The article defines the purpose, role, and place of information security control in infocommunication systems from the perspective of control theory. The article provides a formal statement of the problem of proactive information security control. The article identifies the main levels of proactive information security control in infocommunication systems.

Key words: information and communication system, information security, security control, forecasting, control performance indicators

УДК 004.056
ГРНТИ 49.29.00

ИДЕНТИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ В ПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С. С. Васичкин, А. В. Красов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается аппаратно-программный комплекс для идентификации подключенных устройств в проводных линиях связи. Предлагается активное зондирование линии линейно-частотно-модулированным сигналом в полосе 1-50 МГц и формирование устойчивой сигнатуры по отраженным компонентам. Представлен подход к сопоставлению измеренного вектора признаков с базой эталонов на основе корреляционного анализа и статистических расстояний.

проводные линии связи, активное зондирование, линейно-частотно-модулированный сигнал, сигнатура устройства, коэффициент отражения, идентификация, мониторинг

Задача выявления несанкционированных подключений и изменения конфигурации проводных линий связи актуальна для объектов, где критичны непрерывность обслуживания и предсказуемость параметров канала. Традиционные методы контроля, основанные на рефлектометрии во временной области (с англ. Time Domain Reflectometry, TDR), часто применяются как инструмент разовой диагностики и требуют интерпретации специалистом [1]. При эксплуатации распределенной инфраструктуры востребована формализованная процедура, которая обеспечивает сопоставимость результатов измерений в разные моменты времени и допускает автоматическую интеграцию с системами мониторинга.

Целью работы является разработка и обоснование подхода к идентификации подключенных устройств по параметрам линии, получаемым при активном зондировании, с последующим сравнением с эталонной базой сигнатур. Требуется обеспечить устойчивость признаков к эксплуатационным колебаниям, а также ограничить длительность измерительного цикла, чтобы использовать метод в режиме регулярного контроля. Дополнительно необ-

ходимо сформировать правило принятия решения, позволяющее различать штатное состояние, пограничные изменения и аномалии.

Комплекс выполняет активное параметрическое зондирование линии линейно-частотно-модулированным сигналом в полосе 1-50 МГц с последующей регистрацией отраженного отклика. Измерение дополняется первичной обработкой, включающей нормализацию амплитуды и фазовую привязку, после чего формируется вектор признаков. Вектор включает оценку характеристического сопротивления и коэффициента отражения, а также амплитудно-фазочастотные характеристики на выбранных контрольных частотах. Полный цикл измерения и анализа ориентирован на длительность порядка 5 мс, что позволяет выполнять многократные повторения и учитывать динамику параметров.

Для повышения устойчивости к неизменной структуре кабеля выполняется нормализация отклика относительно пустого состояния линии по формуле 1:

$$\tilde{y}(t) = y(t) - y_0(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – измеренный отклик линии при текущем подключении; $y_0(t)$ – сохраненный отклик линии без подключенного устройства; $\tilde{y}(t)$ – отклик, очищенный от постоянной составляющей линии [2].

Дальнейшие расчеты опираются на этот очищенный сигнал, потому что в реальной эксплуатации кабельная трасса редко меняется, а контроль должен реагировать на подключение оборудования и на его замену. Полученная разность используется как основа для оценки параметров линии и признаков, по которым далее строится сигнатура.

Характеристическое сопротивление линии определяется формулой 2:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где L – индуктивность, C – емкость линии на единицу ее длины.

Любое изменение импеданса, вызванное подключением устройства, ведет к отражению сигнала в линии, что используется для идентификации подключенных устройств [3, 4].

Коэффициент отражения на неоднородности или подключенном устройстве рассчитывается по формуле 3:

$$K = \frac{Z_н - Z_0}{Z_н + Z_0}, \quad (3)$$

где $Z_н$ – импеданс нагрузки (подключенного устройства), а Z_0 – волновое сопротивление линии [5].

Сигнатура подключенного устройства представляется вектором признаков v, включающим частотные и временные параметры. Общая структура вектора может быть записана по формуле 4:

$$v = [\Delta A(f_1), \Delta A(f_2), \dots, \Delta\varphi(f_1), \dots, p(t_1), p(t_2), \mu_\varphi, \sigma_A, \dots], \quad (4)$$

где Δ означает отклонение относительно эталонного состояния, а μ_φ, σ_A – статистические характеристики отклика.

На рисунке 1 показано, как сигнал проходит путь от подачи зондирования до вычисления признаков и передачи их в классификатор, который работает уже с готовым описанием сигнатуры.

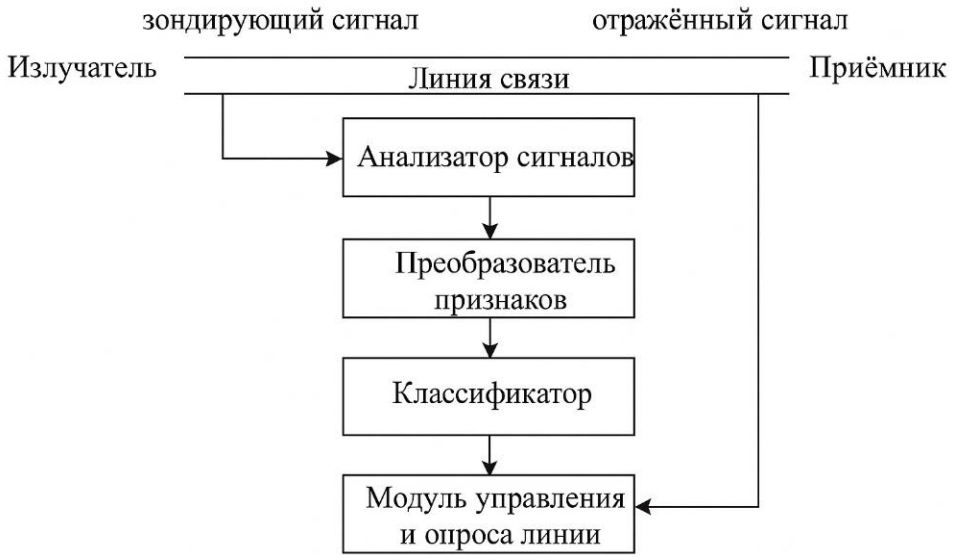


Рис 1. Архитектура аппаратно-программного комплекса

Сопоставление измеренной сигнатуры с эталонами выполняется по метрикам сходства, включающим коэффициент корреляции и статистические расстояния между векторами признаков [4]. По результатам сопоставления вычисляется оценка близости к одному или нескольким эталонам и формируется решение о классе состояния. Для повышения устойчивости контроля используется накопление истории измерений и анализ трендов, что снижает вероятность ложных срабатываний при кратковременных внешних воздействиях.

Для сопоставления текущего вектора v с эталонной базой может использоваться метрика Махаланобиса [6]. Расстояние до эталона класса k определяется по формуле 5:

$$D_k = \sqrt{\left(v_{obs} - v_k^{ref}\right)^{T} \Sigma^{-1} \left(v_{obs} - v_k^{ref}\right)}, \quad (5)$$

где v_k^{ref} – эталонный вектор признаков устройства типа k, $\sum$ – ковариационная матрица по обучающей выборке, D_k – расстояние между текущим и эталонным портретом.

Принятие решения выполняется по пороговому правилу на основе минимального расстояния до эталонов [7]:

– если $\min D_k < D_{\text{порог}}$, то состояние классифицируется как штатное;

– если $\min D_k \geq D_{\text{порог}}$, фиксируется аномалия.

Где $D_{\text{порог}}$ – порог классификации, задаваемый по допустимому уровню ложных срабатываний; $\min D_k$ – минимальное расстояние до эталонной базы по всем классам k [7].

Для оценки практической применимости подхода рассмотрены отличия предлагаемого комплекса от типового использования TDR. Сравнение, представленное на таблице 1, выполнено по критериям воспроизводимости, автоматизации и пригодности для регулярного мониторинга [8].

ТАБЛИЦА 1. Сравнение с типовым применением TDR

Критерий	TDR-диагностика	Предлагаемый комплекс
Цель применения	Поиск неоднородностей и обрывов	Идентификация устройства и контроль изменений
Роль специалиста	Интерпретация трассы обязательна	Решение формируется автоматически
Формализация результата	Описательная, зависит от опыта	Сигнатура и метрики сходства
Режим эксплуатации	Разовые измерения	Регулярный мониторинг с историей
Интеграция с мониторингом	Ограниченная, чаще автономно	Интерфейсная интеграция с системами контроля

Предлагаемый подход ориентирован на переход от разовой диагностики линии к регулярному контролю идентичности подключенного

устройства. Формирование сигнатуры по множеству признаков снижает зависимость решения от единичного измерения и позволяет учитывать эксплуатационные колебания параметров [9]. При наличии базы эталонов метод предоставляет единый механизм подтверждения штатной конфигурации, фиксации пограничных отклонений и регистрации аномалий. Использование короткого цикла измерения порядка 5 мс позволяет выполнять серию повторов, оценивать статистическую устойчивость и повышать доверие к результату [10, 11].

Таким образом, разработан подход к идентификации устройств в проводных линиях связи на основе активного параметрического зондирования и сопоставления сигнатуры с базой эталонов. Архитектура комплекса обеспечивает получение вектора признаков по отраженному отклику, вычисление метрик сходства и автоматизированное принятие решения о состоянии линии.

Практическая ценность подхода заключается в повышении воспроизводимости контроля и возможности его регулярного применения в составе систем мониторинга. Дальнейшая работа может быть направлена на расширение эталонной базы, повышение устойчивости к влиянию условий эксплуатации и проверку метода на различных типах кабельных сегментов и оконечных устройств.

Список используемых источников

1. Уэллс Д. Л. Отражательные измерения в линиях передачи. М.: Радио и связь, 1988. 320 с.

2. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 1079 p.

3. Haykin S. Communication Systems. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2009. 944 p.

4. Furse C., Chung Y. C., Lo C., Pendayala P. A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults // Smart Structures and Systems. 2006. Vol. 2. N 1. P. 25–46. URL: https://www.livewireinnovation.com/wp-content/uploads/2016/03/A-Critical-Comparison-of-different-wire-fault-location-methods.-A-Critical-Comparison-of-different-wire-fault-location-methods..pdf. (дата обращения: 25.01.2026).

5. Giaquinto N., Scarpetta M., Spadavecchia M. Algorithms for Locating and Characterizing Cable Faults via Stepped-Frequency Waveform Reflectometry // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. DOI: 10.1109/TIM.2020.2974110. URL: https://arxiv.org/pdf/1907.12802. (дата обращения: 25.01.2026).

6. ГОСТ Р 54429–2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия. URL: https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=7&id=173416. (дата обращения: 25.01.2026).

7. Mahalanobis P. C. On the generalized distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 1936. Vol. 2. № 1. P. 49-55.

8. Билятдинов К. З., Красов А. В., Меняйло В. В. Исследование систем и анализ результатов испытаний. СПб.: Центр научно-информационных технологий «Астерион», 2019. 362 с. ISBN 978-5-00045-813-6. EDN: OXKBZW.

9. Былина М. С., Глаголев С. Ф. Рефлектометрия кабелей связи. СПб.: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2015. 226 с. ISBN 978-5-89160-112-3.

10. Васичкин С. С. Проектирование комплекса идентификации аппаратных средств в линиях связи // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2025. № 4. С. 166–174. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-166-174. URL: https://journals.igps.ru/temp/148af01b3786f99f3c630fd741af0605.pdf. (дата обращения: 03.02.2026).

11. Smith P., Furse C., Gunther J. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location // IEEE Sensors Journal. 2005. Vol. 5. № 6. P. 1469–1478. DOI: 10.1109/JSEN.2005.858964.

IDENTIFICATION OF DEVICES IN WIRED COMMUNICATION LINES BASED ON ACTIVE PARAMETRIC SENSING

Vasichkin S., Krasov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

A hardware and software package for identifying connected devices in wired communication lines is considered. It is proposed to actively probe the line with a linear frequency-modulated signal in the 1-50 MHz band and form a stable signature based on the reflected components. An approach to comparing the measured feature vector with a reference database based on correlation analysis and statistical distances is presented.

Key words: wired communication lines, active sensing, linear frequency modulated signal, device signature, reflection coefficient, identification, monitoring

УДК 004.051
ГРНТИ 20.01.07

ФОРМАЛИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ БИЗНЕС-КРИТИЧНОСТИ ИНЦИДЕНТА ИБ

Л. А. Виткова[1, 2], Е. Д. Едемская[1]

[1]Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Приоритизация инцидентов ИБ часто основывается на технических характеристиках, что не отражает реального влияния на деятельность организации. В результате инциденты с высокой технической критичностью, но низким бизнес-воздействием получают избыточные ресурсы реагирования, тогда как нарушения критичных бизнес-процессов могут быть недооценены. В работе проведена формализация критериев бизнес-критичности инцидента ИБ как самостоятельной категории оценки. Предложено определять бизнес-критичность через три компонента: вес затронутого бизнес-процесса, тип воздействия на логику процесса и временной контекст. Продемонстрировано принципиальное различие между технической критичностью угрозы и бизнес-критичностью инцидента. Результаты позволяют ввести в системы приоритизации раздельные шкалы оценки и тем самым повысить обоснованность распределения ресурсов службы ИБ в соответствии с интересами бизнеса.

информационная безопасность, SOC, приоритизация инцидентов, распределение ресурсов

Существующие методологии оценивают угрозы в ИТ-контексте, не формализуя воздействие на бизнес-процессы и регуляторные обязательства. Это ведет к неэффективному распределению ресурсов, недооценке критичных инцидентов и росту юридических рисков. Цель статьи – представить модель оценки бизнес-критичности как самостоятельной категории, отделенной от технической критичности угрозы.

Существующие международные стандарты (CVSS, DREAD, ISO/IEC 27005, NIST) [1-4] оценивают воздействие инцидентов исключительно через параметры ИТ-активов (триада CIA), игнорируя бизнес-последствия: финансовые потери, срыв контрактов и регуляторные штрафы. Российское нормативное поле (ФЗ-187, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001) [5-6] также опирается на технические критерии (длительность простоя, объем данных), создавая методологический разрыв между формальным соответствием и реальной защитой бизнес-интересов.

Эмпирический анализ 127 инцидентов в российских организациях (2024–2025 гг.) подтвердил неэффективность текущего подхода:

– перерасход ресурсов: 63% инцидентов с высоким CVSS (>8.0) не повлияли на бизнес-процессы;
– недооценка угроз: 31% инцидентов с низким CVSS (<6.0) повлекли катастрофические бизнес-последствия;
– регуляторные риски: приоритизация технических угроз приводит к задержкам в уведомлении регуляторов о нарушениях (например, ПДн – персональные данные).

Выявленное несоответствие свидетельствует о фундаментальной методологической проблеме: отождествлении технической критичности угрозы и бизнес-критичности инцидента. Для ее устранения необходимо строгое теоретическое разграничение данных категорий (Таблица 1).

Выявленное несоответствие свидетельствует о фундаментальной методологической проблеме: отождествлении технической критичности угрозы и бизнес-критичности инцидента. Для ее устранения необходимо строгое теоретическое разграничение данных категорий, представленное в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная характеристика технической критичности и бизнес-критичности инцидента

Параметр	Техническая критичность угрозы	Бизнес-критичность инцидента
Объект оценки	Потенциал уязвимости или атаки	Фактическое влияние на бизнес-деятельность
Контекст	ИТ-инфраструктура, информационные системы	Бизнес-процессы, стратегические цели, регуляторные обязательства
Временной горизонт	Потенциальный (превентивный, до инцидента)	Актуальный (реактивный, постфактум)
Ответственные	Инженеры ИБ, системные администраторы	Бизнес-аналитики, руководство организации, служба ИБ
Фокус	Степень опасности угрозы	Степень ущерба для бизнеса

Техническая критичность угрозы и бизнес-критичность инцидента представляют собой два независимых измерения, каждое из которых обладает собственной методологией, субъектами оценки и целеполаганием.

На основе теоретического анализа и практики российских организаций предложена формализованная модель оценки бизнес-критичности инцидентов ИБ. Она включает три взаимодополняющих компонента. Количественная формализация компонентов обеспечивает воспроизводимость методики и возможность автоматизации.

Параметр «Вес бизнес-процесса» (W) характеризует его значимость для ценностной цепочки и стратегических обязательств, признавая иерархию процессов в отличие от технических активов. Оценка определяется четырьмя критериями, перечисленными в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Критерии определения веса бизнес-процесса

Критерий	Описание
Стратегическая значимость	Вклад процесса в реализацию миссии организации, исполнение государственных контрактов, участие в национальных проектах
Финансовый вклад	Доля процесса в формировании выручки и прибыли; оценка потенциальных прямых финансовых потерь при остановке процесса
Регуляторные последствия	Вероятность применения штрафных санкций, приостановки лицензий или наступления уголовной ответственности при нарушении регламента процесса
Зависимость других процессов	Количество и степень критичности бизнес-процессов, функционально зависящих от данного процесса

Для формализации параметра разработана пятибалльная оценочная шкала. Градация представлена в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Шкала оценки веса бизнес-процесса

Значение (W)	Критерии
1	Вспомогательный процесс; сбой не влияет на обязательства и выручку
2	Операционный процесс; восстановление в течение суток допустимо
3	Важный процесс; сбой влияет на эффективность, но не на обязательства
4	Критичный процесс; сбой влечет финансовые потери или нарушение контрактов
5	Стратегически критичный процесс; сбой ведет к остановке деятельности или санкциям

Параметр «Тип воздействия» отражает характер нарушения бизнес-логики процесса. Модель учитывает неравнозначность нарушений триады

CIA для разных отраслей. Три базовых типа воздействия, ранжированных по ущербу, приведены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Классификация типов воздействия на бизнес-процесс

Тип воздействия	Характеристика
Нарушение CIA	Потеря конфиденциальности, целостности или доступности без искажения бизнес-логики
Искажение бизнес-логики	Технически корректная работа системы с ошибочными бизнес-результатами
Полная остановка процесса	Невозможность выполнения бизнес-операции

Для количественной формализации типа воздействия разработана пятибалльная шкала на основе обратимости последствий и ресурсов восстановления (таблица 5).

ТАБЛИЦА 5. Шкала оценки тяжести воздействия на бизнес-процесс

Значение (I)	Характеристика
1	Сбой <15 мин., полное автовосстановление
2	Сбой до 1 часа, ручное вмешательство без потери данных
3	Сбой 1-4 часа или частичная потеря данных, значительные трудозатраты
4	Сбой >4 часов или значительная потеря данных, финансовые потери
5	Необратимое искажение или остановка критичного процесса, требуется внешнее вмешательство

Мультипликативная формула обеспечивает синергетический эффект: высокий вес процесса (W=4-5) в критический момент дает максимальную критичность даже при среднем воздействии.

«Временной контекст» отражает динамическую вариативность значимости инцидента, важную в условиях российских регуляторных сроков. Он формализуется как коэффициент масштабирования (T) для оценки (W×I). Шкала коэффициентов зависит от активности и дедлайнов (таблица 6).

ТАБЛИЦА 6. Шкала оценки временного коэффициента

Значение (T)	Условия реализации
0.5	Период пониженной активности. Нерабочее время, выходные или праздничные дни; отсутствие критических бизнес-операций
0.8	Стандартная нагрузка. Рабочее время вне периодов повышенной активности или отчетности

Значение (T)	Условия реализации
1.0	Базовый уровень. Стандартное рабочее время в будний день
1.3	Повышенная нагрузка. Конец отчетного периода (месяц/квартал); предпраздничные дни
1.6	Критический период. Сроки сдачи регуляторной отчетности, проведение аукционов по 44-ФЗ, массовые операции
2.0	Предельная критичность. Непосредственная близость к дедлайну регулятора; сбой в пик технологического цикла

Объединяя три компонента, получили формализованную модель:

$$БК = (W \times I) \times T,$$

где W – вес процесса (1-5), I – тяжесть воздействия (1-5), T – временной коэффициент (0.5-2.0).

Мультипликативная зависимость обусловлена природой бизнес-риска и необходимостью дифференциации приоритетов.

Для реализации модели разработана четырехуровневая шкала интерпретации (таблица 7).

ТАБЛИЦА 7. Шкала интерпретации уровня бизнес-критичности инцидента

Категория	Диапазон БК	Требуемая реакция	Срок эскалации
Низкая	<10	Стандартная обработка в очереди инцидентов	До 24 часов
Средняя	10-25	Повышенное внимание; мониторинг	До 4 часов
Высокая	25-40	Приоритетное реагирование; уведомление руководства службы ИБ	До 60 минут
Критическая	>40	Немедленная эскалация; активация кризисного комитета	До 15 минут

Калибровка порогов выполнена на основе 127 инцидентов (2024–2025 гг.). Практическое применение требует компенсации ограничений:

– субъективность веса: минимизируется ежеквартальной перекалибровкой;
– динамичность среды: требует актуализации карт процессов;
– культурные факторы: нивелируются независимым модератором;
– исследование подтверждает, что бизнес-критичность – самостоятельная категория, не выводимая из технических параметров. Стратегический результат – трансформация парадигмы ИБ от защиты систем к устойчивости бизнеса, где

служба ИБ выступает стратегическим партнером. Модель рекомендуется как методологическая основа, адаптируемая под специфику организации.

Список используемых источников

1. Howland H. CVSS: Ubiquitous and broken [Электронный ресурс] // Digital Threats: Research and Practice. 2023. Т 4. № 1. С. 1-12. URL: https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3491263 (дата обращения: 15.01.2026).

2. Zhai B. Security risk assessment of internet of things health devices using DREAD and STRIDE models [Электронный ресурс] // Ain Shams Engineering Journal. N 16. С. 1-14. URL: https://707.su/veBV (дата обращения: 16.01.2026).

3. ISO/IEC 27005:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection – Guidance on managing information security risks. URL: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:27005:ed-4:v1:en (дата обращения: 20.01.2026).

4. NIST Special Publication 800-30 Revision 1 Guide for Conducting Risk Assessments. 2012. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-30r1.pdf (дата обращения: 27.01.2026).

5. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: Федеральный закон от 26.04.2017 N 187-ФЗ. URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/zakony/federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz?ysclid=mm4u2uk33d966335861 (дата обращения: 15.01.2026).

6. Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений: Постановление Правительства Российской Федерации от 08.02.2018 № 127 (ред. от 07.11.2025). URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/postanovleniya/postanovlenie-pravitelstva-rossijskoj-federatsii-ot-8-fevralya-2018-g-n-127?ysclid=mm4uejkqhw364573498 (дата обращения: 20.01.2026).

FORMALIZATION OF BUSINESS CRITICALITY CRITERIA FOR INFORMATION SECURITY INCIDENTS

Vitkova L.[1, 2], Edemskaya E.[1]
[1]St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
[2]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Prioritization of information security incidents is often based on technical characteristics, which does not reflect the real impact on the organization's activities. As a result, incidents with high technical criticality but low business impact receive excessive response resources, whereas violations of critical business processes may be underestimated. This paper formalizes the criteria for the business criticality of an information security incident as an independent evaluation category. It is proposed to define business criticality through three components: the weight of the affected business process, the type of impact on process logic, and the temporal context. The fundamental difference between the technical criticality of a threat and the business criticality of an incident is demonstrated. The results allow for the introduction of separate evaluation scales into prioritization systems, thereby enhancing the justification for information security service resource allocation in accordance with business interests.

Key words: information security, SOC, incident prioritization, resource allocation

УДК 006.07
ГРНТИ 84.01.01

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ТРЕБОВАНИЙ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ О ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ, НЕ СОДЕРЖАЩЕЙ СВЕДЕНИЙ, СОСТАВЛЯЮЩИХ ГОСУДАРСТВЕННУЮ ТАЙНУ В ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В. А. Волостных[1], В. А. Задбоев[1], А. А. Шевченко[2]

[1]Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье приводится анализ изменений требований законодательства Российской Федерации об обеспечении безопасности информации, обрабатываемой в государственных информационных системах. Изменения законодательства вызваны возросшей агрессивностью угроз безопасности информации в информационных системах, и в первую очередь в государственных информационных системах. Вопросы защиты информации, содержащей сведения составляющие государственную тайну, в статье не рассматриваются. Статья может быть полезна студентам и аспирантам, обучающимся по специальности, связанной с обеспечением функционирования информационных (автоматизированных) систем, а также специалистам обслуживающих государственные информационные системы.

безопасность информации, государственные информационные системы, защита информации, конфиденциальность, нормативные документы, система криптографической защиты информации, средства защиты информации, ответственность, утечка информации

В настоящее время с ростом количества компьютерных атак на информационные системы (ИС) Российской Федерации, возросшей агрессивностью воздействий на информационную инфраструктуру органов государственной власти, научных организаций и промышленных предприятий уделяется большое внимание вопросам защиты информации. Эти обстоятельства привели к необходимости усилить систему защиты информационного пространства России и в том числе информационных ресурсов, обрабатываемых в государственных информационных системах (ГИС).

Основополагающим документом в области информации и защиты информации является Федеральный закон (ФЗ) от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ

«Об информации, информационных технологиях и о защите информации», который постоянно уточняется и дополняется новыми положениями [1].

ФЗ № 149 (в ред. от 1 апреля 2025 г.) определено, что под информационной системой понимается – совокупность содержащейся в базах, данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств. Из этого следует, что вопросы защиты информации, в основном, определяются защищенностью информационной системы.

В статье 13 этого же документа определено, что ГИС – это федеральные и региональные ИС, созданные на основании соответственно ФЗ, законов субъектов Российской Федерации, на основании правовых актов государственных органов. Этим же документом определено, что технические средства ИС, используемых государственными органами, органами местного самоуправления или государственными и муниципальными унитарными предприятиями, должны размещаться на территории Российской Федерации.

Технические средства, предназначенные для обработки информации, содержащейся в ГИС, в том числе программно-технические средства и средства защиты информации (СЗИ), должны соответствовать требованиям законодательства Российской Федерации о техническом регулировании.

Информация, содержащаяся в ГИС, а также иные имеющиеся в распоряжении государственных органов сведения и документы, являются государственными информационными ресурсами. Государственные органы, определенные в соответствии с нормативным правовым актом, регламентирующим функционирование ГИС, обязаны обеспечить доступ к указанной информации в случаях и в порядке, предусмотренных законодательством, ***а также защиту указанной информации от неправомерных доступа, уничтожения, модифицирования, блокирования, копирования, предоставления, распространения и иных неправомерных действий***. Не допускается передача информации из ГИС в иные ИС, не соответствующие требованиям о защите информации.

Операторы ГИС, государственных и муниципальных ИС унитарных предприятий, государственных и муниципальных учреждений при создании и эксплуатации ИС, а также при осуществлении взаимодействия в электронной форме, в том числе с гражданами (физическими лицами) и организациями, не вправе использовать принадлежащие иностранным юридическим лицам и (или) иностранным гражданам ИС и (или) программы для электронных вычислительных машин, функционирование которых осу-

ществляется посредством сети «Интернет», за исключением случаев, установленных Правительством Российской Федерации.

Требования о защите информации, содержащейся в ГИС, иных ИС государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений, устанавливаются ФСБ России и ФСТЭК России в пределах их полномочий. При создании и эксплуатации ГИС, иных ИС государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений применяемые в целях защиты информации методы и способы ее защиты должны соответствовать указанным требованиям.

Важным новым документом в сфере обеспечения защиты информации является Указ Президента Российской Федерации № 250 от 01.05.2022 [2]. Указом определен ряд мероприятий по обеспечению информационной безопасности (ИБ). Указом предписано возложение на заместителя руководителя органа (организации) полномочий по обеспечению ИБ организации, в том числе по обнаружению, предупреждению и ликвидации последствий компьютерных атак и реагированию на компьютерные инциденты. Предписано создание в органе (организации) структурного подразделения, осуществляющего функции по обеспечению ИБ органа (организации), в том числе по обнаружению, предупреждению и ликвидации последствий компьютерных атак и реагированию на компьютерные инциденты, либо возложение данных функций на существующее структурное подразделение. Указом установлено, что с 1 января 2025 г. органам (организациям) запрещается использовать СЗИ, странами происхождения которых являются иностранные государства, совершающие в отношении Российской Федерации, российских юридических лиц и физических лиц недружественные действия, либо производителями которых являются организации, находящиеся под юрисдикцией таких иностранных государств, прямо или косвенно подконтрольные им либо аффилированные с ними.

В 2013 году в соответствии с ФЗ, приказом ФСТЭК России № 17 были утверждены «Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» [3], которые впоследствии уточнялись. Однако в 2025 году приказом № 117 были утверждены новые требования [4], которые вводятся в действие с 1 марта 2026 года.

Несмотря на очевидную преемственность нового документа, он содержит ряд новых положений. Во-первых, в первом разделе требований опре-

делено, что на ГИС, отнесенные к критической инфраструктуре, распространяются требования по защите к КИИ, а при обработке в ГИС персональных данных необходимо руководствоваться требованиями в соответствии с постановлением Правительства РФ [5].

В третьем разделе Требований изложены конкретные мероприятия по защите информации (21 пункт) и раскрыт порядок их выполнения на практике. Спектр мероприятий по сравнению с предыдущими требованиями более широкий и учитывает, как появление новых угроз и новых реалий эксплуатации ГИС, включая обеспечение безопасности при подключении ГИС к сети «Интернет» и применения пользователями мобильных устройств при удаленной работе. Требуется особое внимание операторам ГИС уделять вопросам мониторинга ИБ. В новом документе определены требования к восстановлению ГИС, которые имеют качественные и количественные значения, определены требования к резервированию информационных ресурсов ГИС. Следует отметить, появление мероприятий, касающихся вопросов безопасности ГИС при применении искусственного интеллекта, чего не было в предшествующих документах.

К важным механизмам защиты информации в ИС относится применение средств криптографической защиты информации (СКЗИ). Известно, что вопросы применения СКЗИ лежат в зоне ответственности ФСБ России и известны основные документы, определяющие требования к разработке, изготовлению и применению этих средств [6, 7]. Ранее требований о защите информации, содержащейся в ГИС, с использованием шифровальных (криптографических) средств были утверждены приказом ФСБ России от 2022 года № 524 [8]. Однако в 2025 году приказом ФСБ России от 18 марта 2025 г. № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений, с использованием шифровальных (криптографических) средств», эти требования были изменены [9].

Анализ требований, установленных вновь введенным документом, показал, что принципиальных или существенных изменений документ 2025 года не ввел, но область его применения существенно расширилась, что следует даже из названия. Классы применения СКЗИ, как и в предыдущем документе, определяются в зависимости от масштаба ИС и уровня значимости информации, которая в ИС обрабатывается. Для лиц, осуществляющих

внедрение СКЗИ и/или их применение, новый документ дополнительных требований не ввел, за исключением ссылки на новый приказ.

Выводы и предложения

1. Очевидно, что в последние годы требования о защите информационных систем и соответственно информации ужесточились, что, несомненно, вызвано лавинообразным увеличением количества компьютерных атак на ИС Российской Федерации и их возросшей агрессивностью. Анализ структуры потоков компьютерных атак показывает, что большая часть атак приходится на государственные информационные системы, и их целью является не «фишинг», а «деструктив», заключающийся в блокировании или уничтожении информационных ресурсов, в выводе из строя элементов ИС, снижения их пропускной способности или ухудшения других параметров. Также отмечается усиление интереса ряда группировок т.н. «хакеров» к получению доступа к информации ограниченного доступа, в том числе к информации конфиденциального характера.

2. Очевидно, что требования о защите информации в ГИС распространяются на ИС Вооруженных Сил Российской Федерации, за исключением ряда систем, определенных соответствующими документами.

3. В целях обеспечения защищенности ГИС необходимо требования по защите информации, изложенные в рассмотренных документах реализовать на практике, не дожидаясь указаний вышестоящих организаций и проверок уполномоченных органов.

4. В целях повышения защищенности ИС в учебные и методические документы образовательных организаций, осуществляющих подготовку специалистов по защите информации целесообразно внести изменения и коррективы в соответствии с новыми нормативными правовыми документами, рассмотрение которых проведено в настоящей статье.

5. Можно полагать, что вслед за изменением требований к защите ГИС, требования к защите корпоративных ИС также будут изменены.

Список используемых источников

1. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

2. Указ Президента РФ от 1 мая 2022 г. № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации».

3. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах».

4. Приказ ФСТЭК России от 11.04.2025 № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений».

5. Постановление Правительства РФ от 1 ноября 2012 г. № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».

6. Волостных В. А., Задбоев В. А. Создание систем защищенного электронного документооборота, предназначенных для обработки документов, содержащих информацию ограниченного распространения // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов: сб. науч. ст. СПб. СПбГУТ, 2025. С 79–84.

7. Волостных В. А., Воробьев П. А., Задбоев В. А. Организация защиты конфиденциальной информации на предприятии средствами криптографической защиты // Перспективы безопасности-2024. Сборник материалов II науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2024. С. 9-13.

8. Приказ ФСБ России от 24 октября 2022 г. № 524 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, с использованием шифровальных (криптографических) средств».

9. Приказ ФСБ России от 18 марта 2025 г. № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений, с использованием шифровальных (криптографических) средств».

ANALYSIS OF CHANGES IN THE REQUIREMENTS OF THE LEGISLATION OF THE RUSSIAN FEDERATION ON THE PROTECTION OF INFORMATION THAT DOES NOT CONTAIN DATA CONSTITUTING A STATE SECRET IN STATE INFORMATION SYSTEMS

Volostnyh V.[1], Zadboev V.[1], Shevchenko A.[2]
[1]Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny
[2]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article analyzes changes to Russian legislation regarding the security of information processed in government information systems. These legislative changes are driven by the increased severity of information security threats to information systems, particularly government information systems. The article does not address the protection of information containing state secrets. This article may be useful to undergraduate and graduate students studying in a specialty related to the operation of automated information systems, as well as to specialists servicing government information systems.

Key words: information security, government information systems, information protection, confidentiality, regulations, cryptographic information protection systems, information security tools, liability, information leakage

УДК 004.056.55
ГРНТИ 81.93.29

ПОСТКВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ. СТАНДАРТ МЕХАНИЗМА ИНКАПСУЛЯЦИИ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОЙ РЕШЕТКИ И КВАЗИЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ

И. В. Гвоздков, А. И. Ликарь, Ю. Я. Перевозник

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена анализу современных проблем криптографии в условиях появления квантовой угрозы для классических криптосистем. Рассматривается угроза компрометации алгоритмов RSA и криптографии на эллиптических кривых при появлении квантовых вычислительных средств. Рассмотрены два основных алгоритма шифрования с открытым ключом, способным противостоять квантовой угрозе, представлены их характеристики по реализуемости, производительности и, размеру ключей.

компьютерная безопасность, криптография, шифрование, криптография на основе решеток, инкапсуляция ключей, постквантовая криптография, криптография с открытым ключом

Проблема разработки постквантовых ассиметричных криптографических алгоритмов для передачи секретных ключей, создания и проверки цифровой подписи перешла из теоретической плоскости, обсуждаемой в академическом сообществе, к практическому применению.

Стандартизованные и широко применяемые алгоритмы ассиметричного шифрования RSA, который обеспечивает передачу секретных ключей для симметричного шифрования, и ECDSA, который широко применяется для создания и проверки цифровой подписи, криптостойкость которых основывается на применении односторонних (условно) математических функций дискретного логарифмирования в конечном поле и факторизации (разложении на простые сомножители) больших чисел, при появлении достаточно производительных квантовых компьютеров окажется под угрозой.

Для решения задачи факторизации больших чисел и дискретного логарифмирования в конечном поле может быть применен квантовый алгоритм Шора, который опубликован в 1994 году, где решение задачи дискретного логарифмирования, нахождение такого $\boldsymbol{k}$ по данным $y = g^k$, сводится к вычислению порядка другой функции, а именно: $f(x_1, x_2) = g^{x_1} y^{x_2}$, где g об-

разующая группы с числом элементов, равным q. Период функции представляется парой чисел (w_1, w_2): $f(w_1 + x_1, w_2 + x_2) = f(x_1, x_2)$. Тогда решение задачи дискретного логарифмирования будет иметь вид: $k = -\frac{w_1}{w_2} (\mathrm{mod}\ q)$ [1].

Кроме того, в 2023 году Одед Регев опубликовал новый квантовый алгоритм по факторизации чисел, превосходящий по эффективности алгоритм Шора. Ему удалось обобщить алгоритм на произвольное количество измерений, а не только на два, в результате чего для факторизации чисел квантовому компьютеру требуется гораздо меньше логических шагов [2].

При применении этих алгоритмов и квантовых вычислений задача дискретного логарифмирования в конечном поле (ECDSA) и задача факторизации больших чисел (RSA) решается в полиноминальное время, и позволяет получать закрытые ключи асимметричного шифрования на многие порядки быстрее, чем рассчитывали создатели соответствующих криптографических схем, – за минуты или часы вместо лет и веков. Получив закрытые ключи ассиметричного шифрования, злоумышленник может получить секретные ключи от симметричного шифрования, которые передавались в данном сеансе, что ставит под угрозу информационную безопасность в целом.

Это особенно актуально при реализации сценария «собрать сейчас – расшифровать позже». То есть перехваченные сегодня зашифрованные сообщения могут быть дешифрованы в будущем, когда квантовые вычисления станут доступны, как сейчас традиционные компьютеры [3].

Эта ситуация особенно актуальна для сфер, где особо важная информация должна быть секретной достаточно большое время. К этим сферам относятся государственное управление, оборонная и финансовая сферы, здравоохранение и другие виды деятельности, где утечка данных может иметь нежелательные последствия. В результате квантовая угроза воспринимается не как абстрактный научный риск, а как фактор, который уже сейчас необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации информационных систем [4].

Надо заметить, что криптографические системы симметричного шифрования менее чувствительны квантовым угрозам. Например, поиск секретного ключа алгоритма AES до 256 бит имеет криптографическую стойкость против квантовых вычислений такую же, что поиск ключа размером 128 бит для классических компьютеров. Поэтому проблема решается простым увеличением длины ключа. То же самое относится и к алгоритмам хеширования.

Теоретически алгоритмы, основанные на других математических функциях, способных противостоять квантовым вычислениям, были предложены более 10 лет назад. Это алгоритмы квантовой и постквантовой криптографии, относящиеся к ассиметричному шифрованию.

Первое направление основано на использовании квантовой теории передачи информации, которая реализуется в системах квантового распределения ключей (КРК) и использует специальное оборудование (основной недостаток).

Второе направление – это использование математических функций, которые не подвержены атакам с применением квантовых компьютеров посредством алгоритма Шора (даже усовершенствованного).

В 2016 году NIST[1] объявил конкурс на предмет стандартизации постквантовых криптографических алгоритмов, способных противостоять квантовым угрозам.

На конкурс было подано 82 заявки, из которых прошли отбор 62 претендента, 49 алгоритмов шифрования с открытым ключом и 20 схем цифровой подписи. После 1 тура было отобрано 26 алгоритмов (январь 2019 года)[2], из которых во втором туре (июль 2020 года)[3] отобрано 15 конкурсантов, разделенных на основные и альтернативные (рис. 1) [5].

2 тур	**BIKE** **Classic McEliece** **CRYSTALS-DILITHIUM** **CRYSTALS-KYBER** **FALCON** **FrodoKEM** **GeMSS**	**HQC** LAC LEDAcrypt LUOV MQDSS NewHope **NTRU**	**NTRU Prime** NTS-KEM **Picnic** qTESLA **Rainbow** ROLLO Round5	RQC **SABER** **SIKE** **SPHINCS+** Three Bears

Рис. 1. Итоги второго тура

[1] NIST (National Institute of Standards and Technology) – Национальный институт стандартов и технологий США

[2] Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process / Alagic G., Alperin-Sheriff J. and other // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST Internal Report (IR), NISTIR 8240, January 2019, 27 pp. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8240 (дата обращения: 12.01.2026).

[3] Status Report on the Second Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process / Alagic G., Alperin-Sheriff J. and other // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NISTIR 8309, July 2020, 39 pp. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8309 (дата обращения: 12.01.2026).

В результате третьего тура, опубликованном в июле 2022 года[4], было отобрано четыре алгоритма в качестве стандарта: шифрование с открытым ключом – CRYSTALS-KYBER; алгоритмы цифровой подписи – CRYSTALS-DILITHIUM, FALCON, SPHINCS+. В марте 2025 года[5] года к алгоритмам шифрования с открытым ключом добавлен в качестве стандарта алгоритм HQC. Отбор претендентов проводился по следующим параметрам: аппаратная и программная реализация, безопасность, производительность и размер ключей.

Алгоритм шифрования с открытым ключом CRYSTALS-KYBER

Это алгоритм (опубликованный NIST как FIPS 203) инкапсуляции ключей, основанный на модульных решетках (module-LWE). Сначала он строится как схема шифрования с открытым ключом с безопасностью IND-CPA (неотличимость при атаке на открытый текст), а затем преобразуется в механизм инкапсуляции ключей с безопасностью IND-CCA (неотличимость при атаке на шифр-текст).

Стандарт определяет набор из 21 алгоритмов для создания общего секретного ключа. Метод создания общего секретного ключа, описанный в стандарте FIPS 203 – это механизм инкапсуляции ключей (KEM). В KEM вычисление общего секретного ключа начинается с того, что абонент «А» генерирует ключи декапсуляции и инкапсуляции. «А» сохраняет ключ декапсуляции в секрете и предоставляет ключ инкапсуляции абоненту «Б». абонент «Б» использует ключ инкапсуляции «А» для генерации первой копия общего секретного ключа вместе с соответствующим зашифрованным текстом. Затем «Б» отправляет зашифрованный текст «А». Наконец, «А» использует зашифрованный текст от «Б» вместе с личным ключом декапсуляции для вычисления другой копии общего секретного ключа (рис. 2). Безопасность механизма KEM, связана с вычислительной сложностью решения

[4] Status Report on the Third Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process / Alagic G., Apon D. and other // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST Internal Report (IR), NISTIR 8413-updl, July 2022, 102 pp. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8413-upd1 (дата обращения: 12.01.2026).

[5] Status Report on the Fourth Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process / Alagic G., Bros M. and other // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST Internal Report (IR), NISTIR 8545, March 2025, 34 pp. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8545 (дата обращения: 12.01.2026)

определенных систем линейных уравнений с помехами, в частности задачи модульного обучения с ошибками (MLWE).

В этом стандарте указаны три набора параметров для ML-KEM. В порядке возрастания уровня безопасности (и снижения производительности): ML-KEM-512, ML-KEM-768 и ML-KEM-1024.

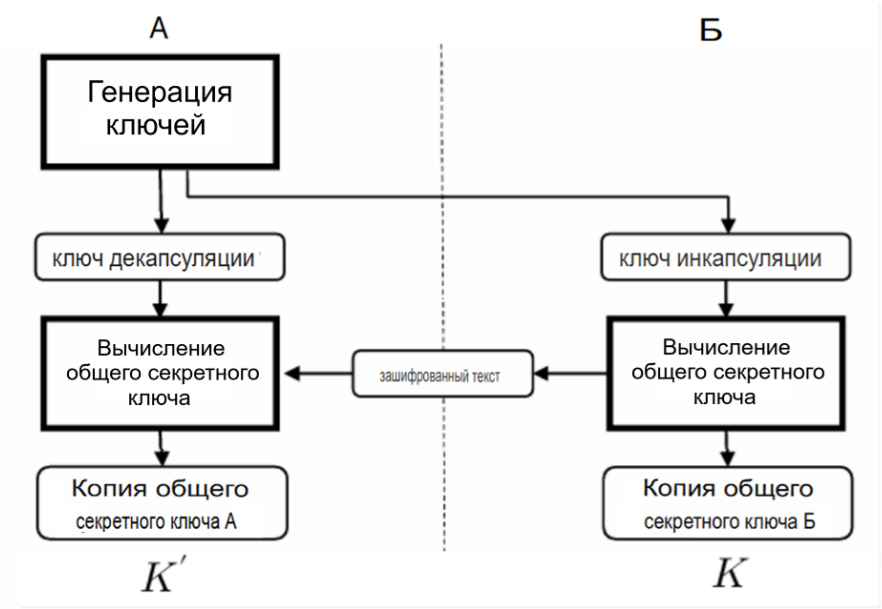


Рис. 2. Упрощенная схема вычисления общего секретного ключа

Алгоритм шифрования с открытым ключом HQC

В то время как алгоритм ML-KEM основан на математической идее, называемой структурированными решетками, алгоритм HQC основан на другой концепции – кодах коррекции, которая используется в информационной безопасности уже десятилетиями. HQC требует больше вычислительных ресурсов чем ML-KEM, однако использует отличный от него математический аппарат, обладает требуемой стойкостью к квантовой угрозе и станет достойным запасным вариантом. Стандартизация ожидается в 2027 г.

Алгоритм HQC использует метод инкапсуляции ключей, основанный на теории кодов исправления ошибок (квазициклических кодах, QC-MDPC), позволяет скрывать данные в шуме таким образом, чтобы только владелец секретного ключа мог эффективно расшифровать их.

HQC также использует протокол шифрования, похожий на LWE. В его реализации применяется кольцо $R = F_2[x] \,/\, (x^n - 1)$, где n – простое число, имеет всего два несократимых множителя по модулю 2. Секретный ключ

представляет собой случайно выбранную пару $(x, y) \in R^2$, а открытый ключ пару $(h, s = x + h \cdot y)$, где h выбирается случайным образом и используется для построения матрицы генератора $G \in F_2^{k \times n}$ [5].

Поскольку секретный ключ генерируется независимо от кода, в публичной матрице проверки четности HQC нет скрытой структуры, что обеспечивает безопасность независимо от алгоритма декодирования.

Сравнение производительности и размеров ключей алгоритмов CRYSTALS-KYBER и HQC представлен на рис. 3 [5].

Параметр	Уровень NIST	Количество циклов (тыс)			Размер в байтах		
		Генерация ключа	Инкапсуляция	Декапсуляция	СК	ОК	ШТ
Kyber512	I	33,9	45,2	34,6	1 632	800	768
hqc-128	I	105	197	360	56	2 249	4 497
Kyber768	III	52,7	67,6	53,2	2 400	1 184	1 088
hqc-192	III	244	460	746	64	4 522	9 042
Kyber1024	V	73,5	73,5	79,1	3 168	1 568	1 568
hqc-256	V	4 246	844	1 410	72	7 245	14 485

Рис. 3. Сравнение алгоритмов CRYSTALS-KYBER и HQC

Результаты сравнения алгоритмов CRYSTALS-KYBER и HQC позволяет сделать следующий вывод: CRYSTALS-KYBER больше подойдет для приложений, где важны скорость, а HQC обладает менее оптимальной производительностью и подойдет для ситуаций, где важна устойчивость к атакам на основе кодовых решеток.

Заключение

Постквантовая криптография уже перешла из области академических исследований в сферу практической стандартизации. Стремительное развитие квантовых технологий требует более надежных подходов к обеспечению безопасности. Речь идет о фундаментальной смене математической базы, на которой строится стойкость используемых постквантовых алгоритмов шифрования с открытым ключом.

Список используемых источников

1. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring // Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 1994. p. 124–134.

2. Regev O. On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography // Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. 2023. p. 84–93.

3. NIST IR / SP по переходу к постквантовой криптографии (Transition to Post-Quantum Cryptography Standards). NIST, 2024.

4. Chen L., Moody D., Shen Y. NIST Post-Quantum Cryptography Standardization // NIST Interagency Report 8105, 2016.

5. Модель цифровой платформы для анализа устойчивости к квантовым угрозам / М. В. Ларина, В. Ю. Скиба // Правовая информатика. 2025, № 3. С. 12-26.

6. Постквантовые криптосистемы: открытые вопросы и существующие решения. Криптосистемы на решетках / Е. С. Малыгина, А. В. Куценко, С. А. Новоселов [и др.] // Дискретный анализ и исследование операций. 2023. Т. 30. № 4(158). С. 46 – 90.

7. National Institute of Standards and Technology. FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism (ML-KEM). U.S. Dept. of Commerce, 2024.

POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY. STANDARD FOR A KEY ENCAPSULATION MECHANISM BASED ON A MODULAR LATTICE AND QUASI-CYCLIC CODES

Gvozdkov I., Likar A., Perevoznik Yu.,
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the analysis of modern cryptography problems in the context of the emergence of a quantum threat to classical cryptosystems. The threat of compromise of RSA algorithms and elliptic curve cryptography with the advent of quantum computing tools is considered. Two main public-key encryption algorithms capable of resisting the quantum threat are considered, and their characteristics in terms of feasibility, performance, and key size are presented.

Key words: computer security, cryptography, encryption, lattice-based cryptography, key encapsulation, post-quantum cryptography, public key cryptography

ГРНТИ 20.23.25
УДК 004.056.5

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКРЫТОГО ВЛОЖЕНИЯ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ СТЕГАНОГРАФИИ В ИСПОЛНИМЫЙ КОД К ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРОЦЕССАМ КОМПОНОВКИ И ОПТИМИЗАЦИИ

М. Гилавоги, А. В. Красов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

В статье исследуется практическая применимость метода стеганографии исполняемого кода, основанного на замене семантически эквивалентных инструкций, для задач аутентификации программных модулей. Ключевым результатом работы является экспериментальное выявление ограничения: из множества теоретически возможных эквивалентностей (MOV/PUSH-POP, XOR/MOV и др.) практически пригодными для надежного скрытого вложения оказались только синонимичные пары условных переходов JE/JZ и JNE/JNZ, имеющие идентичный машинный код. Прочие замены, как показано, ведут к нарушению работоспособности или целостности файла. Для систематического поиска и анализа таких инструкций разработан специализированный анализатор на Python. С его помощью проведена серия экспериментов по оценке робустности вложений на основе JE/JZ к процессам компоновки и оптимизации. Результаты демонстрируют абсолютную (100%) устойчивость к компоновке и высокую сохранность (свыше 95%) при оптимизации компилятором, что подтверждает возможность использования данного узкого, но надежного класса эквивалентностей для построения практических систем скрытой маркировки ПО.

цифровая стеганография, исполняемый код, условные переходы, JE/JZ, JNE/JNZ, эквивалентные инструкции, робустность, оптимизация компилятора, статический анализ, Ghidra, обратная инженерия, практическая валидация

Задача скрытой маркировки исполняемых файлов цифровыми водяными знаками (ЦВЗ) для контроля их целостности и аутентификации в процессе коллективной сборки остается актуальной [1, 2]. Теоретической основой для такого вложения часто служит использование семантически эквивалентных инструкций (например, MOV RAX, RBX и PUSH RBX; POP RAX), чья замена не должна влиять на логику программы, но позволяет кодировать скрытую информацию [3-5].

Однако практическая реализация этого подхода сталкивается с фундаментальными проблемами прагматической эквивалентности. Даже если две инструкции логически эквивалентны в изоляции, их замена в контексте реального бинарного файла может:

1. Нарушить выравнивание кода или смещения переходов.

2. Изменить состояние флагов процессора, от которого зависят последующие инструкции.

3. Взаимодействовать с алгоритмами оптимизации компоновщика или компилятора непредсказуемым образом.

4. Привести к повреждению структур данных файла (заголовков, таблиц перемещений), что делает его неисполняемым.

Следовательно, критически важным является не теоретический поиск эквивалентностей, а экспериментальная верификация их пригодности для стеганографии в реальных условиях обработки исполняемых файлов.

Целью данной работы является:

1. Экспериментальная проверка широкого круга теоретических эквивалентностей инструкций x86/x86-64 на предмет их практической применимости для стеганографического вложения.

2. Выявление и обоснование узкого класса инструкций, чья замена является безопасной и не нарушает работоспособность кода после компиляции, компоновки и оптимизации.

3. Оценка робустности вложения на основе выявленного класса инструкций к ключевым процессам постобработки.

Научная новизна работы заключается в смещении фокуса с теоретического моделирования на эмпирическое тестирование, приведшее к важному выводу: для надежного скрытого вложения в скомпилированный код пригоден лишь ограниченный набор синонимичных инструкций, что имеет ключевое значение для проектирования практических систем [6].

Методология исследования

Методология включала две фазы: скрининг и углубленное тестирование.

Фаза 1: Скрининг с помощью анализатора

Для автоматизации создан анализатор на Python с функциями:

– дизассемблирование *(Capstone Engine)* секции *.text*;
– расширенная база знаний эквивалентностей (базовые, арифметические, логические, синонимы переходов) [3-7];
– контекстный анализ рисков замены. Анализатор генерировал отчет о потенциальных точках вложения для тестовых файлов.

Фаза 2: Практическая проверка и отсев

Каждая категория эквивалентностей проверялась:

1. Модификация файлов с помощью Ghidra [8].

2. Функциональное тестирование работоспособности.

3. Анализ причин сбоев (GDB, дизассемблер).

Результат скрининга: Большинство теоретических эквивалентностей оказались непригодными:

– замены, изменяющие размер, нарушали выравнивание;
– замены, влияющие на флаги, ломали логику переходов;
– оптимизатор удалял или преобразовывал «эквивалентные» инструкции [9].

Единственным рабочим классом оказались синонимичные условные переходы: JE/JZ и JNE/JNZ [10].

Обоснование выбора JE/JZ:

1. Идентичный машинный код (опкод 0x74 для JE/JZ, 0x75 для JNE/JNZ) – не замена, а альтернативная мнемоника.

2. Нулевое влияние на размер, выравнивание, флаги и поведение программы.

3. Устойчивость к обработке компилятором, ассемблером и линкером [5].

Исследование робустности было сосредоточено исключительно на этих парах.

Экспериментальное исследование робустности метода JE/JZ

Методика эксперимента

Исследование проводилось на 10 модулях на C, скомпилированных в объектные файлы GCC. Использовался 128-битный ЦВЗ. Стратегия кодирования: бит «1» → JZ/JNZ, бит «0» → JE/JNE. Для надежности каждый бит дублировался в 3-х независимых инструкциях (кодирование (3,1)).

Процедура:

1. Анализ и планирование: Анализатор составлял карту инструкций JE/JNE в. O файлах.

2. Модификация: В ассемблерных файлах (. s) производилась замена JE↔JZ согласно плану.

3. Постобработка: Модифицированные файлы линковались и перекомпилировались с флагами -O_0, O_1, O_2, O_3,-O_s.

4. Детектирование: Анализатор извлекал ЦВЗ, определяя бит «1» по наличию JZ/JNZ. Успешность проверялась мажоритарным декодированием.

Результаты и анализ

Плотность вложения: Инструкции условных переходов (JE, JNE, JZ, JNZ) составляют 1.5– 4% от общего кода, что обеспечивает гарантированную, хоть и ограниченную, емкость [10].

Устойчивость к компоновке: 100% успешного извлечения (300 испытаний). Линковка не затрагивает внутренний код инструкций.

Устойчивость к оптимизации: Данные сведены в Таблицу 1 и визуализированы на рисунке 1.

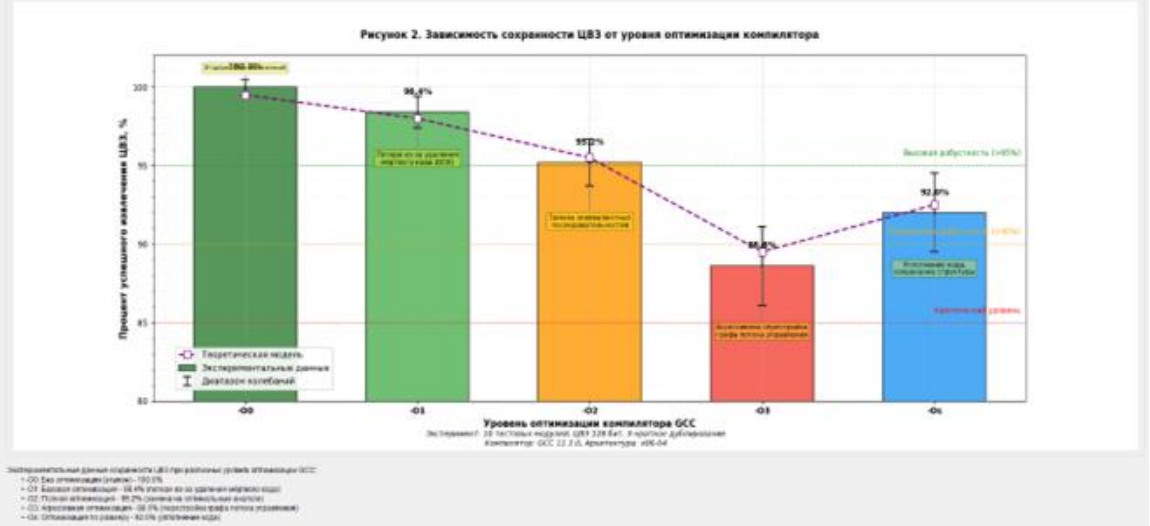


Рисунок 1. График зависимости процента сохранности ЦВЗ от уровня оптимизации компилятора GCC

ТАБЛИЦА 1. Результаты эксперимента по оценке робустности метода JE/JZ

Уровень оптимизации	Успешное извлечение	Процент	Комментарий
$-O_0$	150 / 150	100%	Базовый уровень
$-O_1$	149 / 150	99.3%	Потери из-за удаления неисполняемого кода
$-O_2$	148 / 150	98.7%	Перестройка графа потока управления
$-O_3$	143 / 150	95.3%	Замена на конструкции вроде CMOV
$-O_s$	147 / 150	98.0%	Редко затрагивает переходы

Список используемых источников

1. Коржик В. И. Цифровая стеганография: учебник / В. И. Коржик, А. В. Красов. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «КноРус», 2023. 324 с. ISBN 978-5-406-10970-0. EDN: KNKBXU.

2. Цифровая стеганография и цифровые водяные знаки / В. И. Коржик, С. О. Анфиногенов, А. И. Кочкарев [и др.]. Том 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2017. 198 с. ISBN 978-5-89160-153-6. EDN: UNUPQR.

3. Shterenberg, S. I. Analysis of using equivalent instructions at the hidden embedding of information into the executable files / S. I. Shterenberg, A. V. Krasov, I. A. Ushakov // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. Vol. 80, No. 1. P. 28-34. EDN: UVYEWX.

4. Красов А. В. Защиты диссертаций в России в области стеганографии / А. В. Красов // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025): Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 376-381. EDN: SZHUUP.

5. Красов А. В. Аутентификация программного обеспечения при помощи вложения цифровых водяных знаков в исполняемый код / А. В. Красов, А. С. Верещагин, А. Ю. Цветков // Телекоммуникации. 2013. № S7. С. 27-29. EDN: REKFXZ.

6. Красов А. В. Разработка методов защиты от копирования ПО на основе цифровых водяных знаков внедряемых в исполняемые и библиотечные файлы / А. В. Красов, С. И. Штеренберг // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании II Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2013 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2013. С. 847-852. EDN: SMCRAZ.

7. Алгоритмы и методы защиты программного кода на базе обфускации / А. В. Красов, И. П. Зуев, П. В. Карельский [и др.] // I-methods. 2020. Т. 12, № 1. С. 1-12. EDN: ZGFHEN.

8. Sharikov P. I. A study of the correctness of the execution of a class file with an embedded digital watermark in different environments / P. I. Sharikov, A. V. Krasov, V. N. Volkogonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 16–18 апреля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 862. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52052. DOI 10.1088/1757-899X/862/5/052052. EDN: HXUBEI.

9. Красов А. В. Исследование применимости известных методов внедрения цифровых водяных знаков к исполняемым файлам Unix-подобных систем / А. В. Красов, В. И. Борисов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2022. Т. 56, № 2. С. 38-42. DOI: 10.46418/0021-3489_2022_56_02_07. EDN: NSRRTA.

10. Красов А. В. Метод защиты авторских прав и целостности программного обеспечения на основе внедрения ЦВЗ в исполняемый код / А. В. Красов // Перспективы науки. 2022. № 4(151). С. 16-25. EDN: OHFBUV.

INVESTIGATION OF THE ROBUSTNESS OF HIDDEN EMBEDDING USING DIGITAL STEGANOGRAPHY METHODS INTO EXECUTABLE CODE AGAINST SUBSEQUENT LINKING AND OPTIMIZATION PROCESSES

Guilavogui M., Krasov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article investigates the practical applicability of executable code steganography based on the substitution of semantically equivalent instructions for authenticating software modules. A key result of the work is the experimental identification of a limitation: out of the multitude of theoretically possible equivalences (e.g., MOV/PUSH-POP, XOR/MOV), only the synonymous pairs of conditional jumps JE/JZ and JNE/JNZ, which have identical machine code, proved to be practically suitable for reliable hidden embedding. As shown, other substitutions lead to a violation of file functionality or integrity. A specialized Python analyzer was developed for the systematic search and analysis of such instructions. Using this analyzer, a series of experiments was conducted to evaluate the robustness of embeddings based on JE/JZ against linking and optimization processes. The results demonstrate absolute (100%) robustness to linking and high preservation (over 95%) under compiler optimization, confirming the possibility of using this narrow but reliable class of equivalences for building practical systems of hidden software marking.

Keywords: digital steganography, executable code, conditional jumps, JE/JZ, JNE/JNZ, equivalent instructions, robustness, compiler optimization, static analysis, Ghidra, reverse engineering, practical validation

УДК 004.8
ГРНТИ 49.33.35

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В СФЕРЕ ЗАЩИТЫ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Н. А. Демидов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье рассматриваются проблемы защиты облачных вычислений и облачных сервисов.

Выделены основные направления исследований на современном этапе с учетом инновационной политики компаний и предприятий в сфере обеспечения информационной безопасности ведения бизнеса.

Рассмотрены подходы исследователей к формированию стратегии обеспечения защиты облачных вычислений и хранилищ данных.

защита облачных вычислений, кибербезопасность, облачные технологии

В условиях расширения сферы использования облачных вычисления и нарастающего количества обращений активных пользователей к данным видам услуг, исследование проблем защиты вычислений, сетей и систем хранения приобретает значимую актуальность. Исследование различных аспектов данного направления обеспечения информационной безопасности является предметом изучения многих отечественных ученых.

По общей экспертной оценке, выделяются три базовые свойства информационной безопасности – конфиденциальности, целостности и доступности. А. В. Красов обозначает ключевые проблемы, которые необходимо решить в первую очередь: 1. Исследование механизмов аутентификации пользователей и использования защищенного канала связи на пути между клиентом и сервером. 2. Исследование способов хранения информации в зашифрованном виде, ее обработки и поиска в облачном хранилище» [1].

Автор приводит анализ существующих решений для мониторинга компьютерной безопасности с использованием больших данных, проводятся сравнительные выводы об использовании известных подходов в этой области [2].

Результаты исследования М. В. Гладкого открывают перспективу дальнейшего изучения направления исследований на современном этапе с уче-

том инновационной политики компаний и предприятий в сфере обеспечения информационной безопасности ведения бизнеса. Автор утверждает, что предприятия должны обладать возможностью проверить, что ресурсам не нанесен вред и системы не скомпрометированы, особенно в ситуации, когда они размещаются в разделяемой физической среде [3].

В исследовании подчеркивается, что решение данных проблем позволит повысить уровень конфиденциальности, целостности и доступности данных в облачных средах.

Исследователи утверждают [4], что, по сути, обеспечение безопасности информационной системы (ИС) предполагает выявление уникальных угроз и вызовов, которые необходимо устранять путем принятия соответствующих контрмер.

Текущие задачи обеспечения информационной безопасности требовали разработки решений наиболее актуальных проблем в оперативном режиме и, вместе с тем, необходима была исследовательская работа по определению перспективных направлений развития защиты и прогнозирования с последующей разработкой инновационной стратегии обеспечения комплексной безопасности облачных вычислений.

Изучение основ обеспечения облачной безопасности обосновало необходимость проектирование стратегии развития всего комплекса организации информационной безопасности.

В частности, в современных исследованиях выделены условия организации безопасности использования средств вычислительной техники. Архитектура отечественных средств вычислительной техники должна включать автономное средство защиты, полностью контролирующее функционирование информационной системы, обеспечивающее доверие и безопасность [5].

Для защиты программного обеспечения исследователями предлагается использовать так называемую интеграционную парадигму, которая базируется на четырех постулатах: контроль всех без исключения взаимодействий в системе; инвариантность средств защиты по отношению к приложениям и ресурсам; контроль информационных взаимодействий на основе четко определенных правил, составляющих формальную модель; оценка безопасности, как текущего состояния системы, так и прогнозирование безопасности будущих состояний [6].

Парадигма может служить концептуальной основой для разработки проектов стратегий обеспечения защиты на различных уровнях взаимодей-

ствия в киберпространстве в контексте развития технологий искусственного интеллекта.

В сфере данной проблемы изучаются различные аспекты, исследованию которых уже посвящено большое количество научных публикаций [7-9].

Особое внимание уделяется максимизации уровня безопасности при распределенной обработке данных. Данная проблема усугубляется рисками, связанными с промежуточным положением вычислительных узлов, что требует разработки инновационных решений для минимизации потенциальных угроз и обеспечения надежности системы в целом.

Рассматривая аспекты современных исследований, посвященных защите облачных вычислений, отметим прослеживаемую тенденцию, которая заключается в необходимой организации перехода от систематического контроля к постоянному мониторингу и осуществлению оперативного реагирования на возникающие угрозы. Для автоматизации процессов проверки каждого компонента, увеличения скорости реакции при отражении атак и прогнозирования потенциальных уязвимостей необходимо внедрять технологию искусственного интеллекта.

На наш взгляд должна быть рассмотрена возможность интеграции передовых методов машинного обучения и анализа больших данных для повышения эффективности системы безопасности. Это позволит не только оперативно обнаруживать угрозы, но и прогнозировать их развитие, что является критически важным в условиях постоянно меняющейся киберсреды.

Облачная безопасность представляет собой комплекс политик, контрольных механизмов и технологических решений, направленных на защиту данных, приложений и инфраструктурных сервисов. Этот комплекс мер, также известный как безопасность облачных вычислений, охватывает широкий спектр технологий, процессов и контрольных элементов, используемых для обеспечения безопасности облачных инфраструктур, сервисов и приложений, а также данных, которые хранятся или обрабатываются в облачной среде. Все эти компоненты функционируют синергетически, создавая многоуровневую систему защиты, которая предотвращает угрозы и уязвимости в сфере кибербезопасности как извне, так и изнутри облачной экосистемы.

Последовательное расширение спектра компонентов, которые становятся базовыми для обеспечения постоянного наблюдения за ними с целью контроля в условиях возникновения новых угроз и выявлением новых уяз-

вимостей, может быть обозначено, как одно из основных направлений развития защиты.

В контексте современных информационных технологий аппаратная поддержка виртуализации играет ключевую роль в обеспечении безопасности вычислительных систем. Данная функция, интегрированная на уровне аппаратного обеспечения, позволяет виртуализировать операционные системы, что является критически важным аспектом для защиты данных и ресурсов. С точки зрения значимости, аппаратная виртуализация не уступает таким традиционным методам обеспечения безопасности, как управление доступом, идентификация, аутентификация, аудит и контроль [6]. Таким образом, интеграция аппаратной поддержки виртуализации в архитектуру вычислительных систем представляет собой необходимый элемент комплексной стратегии обеспечения информационной безопасности.

Требование к поливариативности защиты вызвано не только включением новых компонентов в облачную платформу и появлением новых уязвимостей, но и необходимостью разработки инновационных методов защиты и созданием новых средств защиты против угроз безопасности.

Актуальным является непрерывный контроль за действиями каждого пользователя в рамках политики организации доступа и анализ последствий нарушений правил-инструкций безопасности.

Итак, современные исследования в области обеспечения информационной безопасности облачных вычислений активно интегрируют искусственный интеллект (ИИ) как ключевую технологию, обладающую значительным потенциалом для повышения эффективности и точности прогнозов.

Значимость решения проблем защиты облачной вычислений, сетей и систем хранения усиливается с ростом спроса на предоставление данного вида услуг. Очевидно, что вопросы организации защиты облачных вычислений требуют дальнейшего теоретического осмысления.

В результате анализа научных исследований можно прийти к выводу, что обеспечение согласованной архитектуры безопасности между облачными инфраструктурами и периферийными устройствами представляет собой одну из ключевых задач в области защиты облачных вычислений.

Список используемых источников

1. Красов А. В., Левин М. В., Фостач Е. С. Проблемы обеспечения безопасности облачных вычислений //Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2017). 2017. С. 520-522.

2. Котенко, И. В. Технологии больших данных для мониторинга компьютерной безопасности / И. В. Котенко, И. А. Ушаков. Текст непосредственный // Защита информации. Инсайд. 2017. № 3 (75). С. 23-33.

3. Гладкий, М. В. Безопасность приложений на платформах облачных вычислений / М. В. Гладкий // Труды БГТУ. № 6. Физико-математические науки и информатика, 2015. С. 204-207.

4. Dimitrios Zissis, Dimitrios Lekkas, Addressing cloud computing security issues, Future Generation Computer Systems, Volume 28, Issue 3, 2012, Pages 583-592, ISSN 0167-739X, https://doi.org/10.1016/j.future.2010.12.006

5. Borzykh S., Markov A., Tsirlov V., Barabanov A. Detecting Code Security Breaches by Means of DataflowAnalysis. In CEUR Workshop Proceedings, 2017, Vol. 2081. P. 15–20.

6. Зегжда Д. П. Особенности обеспечения информационной безопасности вычислительных систем / Д. П. Зегжда, И. Ю. Жуков. // Безопасность информационных технологий. 2021. № 1. С. 42–61.

7. Gormuş, Sedat, Hakan Aydin, and Guzin Ulutaş. «Security for the internet of things: a survey of existing mechanisms, protocols, and open research issues» Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 33. N 4 (2018): 1247–1272.

8. Qiu, Meikang, Sun-Yuan Kung, and Keke Gai. «Intelligent security and optimization in Edge/Fog Computing» Future Generation Computer Systems 107 (2020): 1140–1142.

9. Rezapour, Ronita, et al. «Security in fog computing: A systematic review on issues, challenges and solutions» Computer Science Review 41 (2021): 100421. ISSN 1574-0137, https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100421

SOME ASPECTS OF RESEARCH IN THE FIELD OF CLOUD COMPUTING PROTECTION

Demidov N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article discusses the problems of protecting calculations, networks, and data storage systems.

The main research areas at the current stage are highlighted, taking into account the innovative policies of companies and industries in the field of information security for business.

The article examines the approaches of researchers to formulating a strategy for protecting cloud computing and data storage.

Key words: cloud computing protection, cybersecurity, cloud technologies

УДК 004.056
ГРНТИ 28.19.27

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЕХ ВИДОВ АТАК НА РОЙ РОБОТОВ В ЗАДАЧЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ

И. А. Зикратов[1], Т. В. Зикратова[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
[2]Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова

Обсуждается построение механизмов защиты мобильных мультиагентных робототехнических систем от атак со стороны вредоносных роботов с тремя вариантами стратегий поведения. Подобные атаки осуществляются путем формирования и передачи членам роя дезинформации о среде и наблюдаемых объектах, а также иными действиями, которые не имеют идентифицируемых признаков вторжения роботов-диверсантов, и приводят к принятию ошибочного решения в процессе коллективного восприятия.

мультиагентные робототехнические системы, коллективное восприятие, роевый интеллект, байесовский классификатор

В этой статье предлагается новый сценарий проблемы коллективного восприятия, при котором роботы должны исследовать свою среду и коллективно принимать решение, какой образ исследуемой среды наиболее близок к оригиналу. Отличием от известных сценариев является наличие в составе роя вредоносных роботов. Известен ряд методов решения таких задач роем роботов, например Direct Modulation of Majority-based Decisions (DMMD) [1], Direct Modulation of Voter-based Decisions (DMVD) [2], и Direct Comparison (DC).

Для оценки эффективности различных методов роевого интеллекта принято использовать стандартные сценарии, на которых легко оценить достоинства того или иного подхода. В частности, в работе [3] предложен сценарий дискретной коллективной оценки, при котором роботы перемещаются по сцене, состоящей из клеток черного или белого цвета, и находясь в информационном обмене друг с другом пытаются выявить, какой цвет является превалирующим на сцене. К другим сценариям относятся определение наиболее вероятного коэффициента цветового заполнения на основе серии дискретных гипотез о соотношении заполнения, или создание коллективом роботов карты исследуемой сцены.

Авторами предложен сценарий, в котором сцена состоит из клеток пяти цветов, по которой случайным образом перемещаются шесть роботов, создающие локальные карты (ЛК) обследованных участков сцены (рис. 1). На сцене есть два доминирующих цвета (40% и 30% клеток), и остальные три цвета распространены равномерно (по 10% клеток).

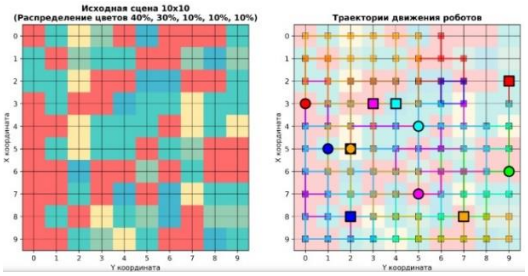


Рис. 1. Исследуемая сцена и ее карта с траекториями движения роботов

Цель роя – на основе объединения ЛК построить глобальную карту исследуемой сцены (рис. 2).

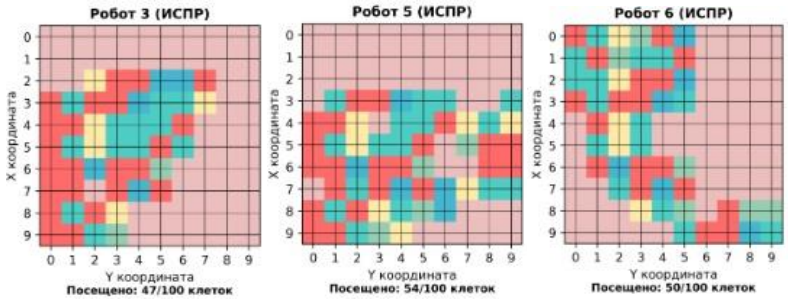


Рис. 2. Локальные карты сцены, составленные исправными роботами №№ 2, 3 и 6

Роботы роя обладают ограниченными возможностями в области восприятия, коммуникации и вычислений. Они могут общаться только с другими роботами в радиусе действия связи, способны только определять цвет плиток непосредственно под ними и обладают лишь простым реактивным поведением. Указанные факторы можно расценивать как уязвимости, способствующие реализации угроз нарушения конфиденциальности и целостности информации, циркулирующей в робототехнической системе. Источниками угроз для мультиагентных робототехнических систем могут являться вредоносные роботы (ВР), внедренные в рой и осуществляющие деструктивное воздействие на информацию.

Известны три основных атаки ВР: ВР со случайной стратегией поведения (ССП), ВР с оппозиционной стратегией поведения (ОСП), ВР с координированной стратегией поведения (КСП). Формальное описание этих стратегий подробно приведено в работе [4].

Вредоносный робот с ОСП предлагает любую альтернативу, но которая никогда не совпадает с реальной. Инче говоря, ВР сообщает рою любой из возможных цветов клетки, на которой он находится, кроме истинного цвета. Суть ССП состоит в том, что каждый ВР на каждой итерации исследования предлагают альтернативу из множества доступных, выбранную случайным образом. Главное отличие КСП от других стратегий ВР заключается в том, что все ВР с КСП изначально имеют глобальную предустановку, и выбор на каждой итерации процесса достижения консенсуса происходит в пользу некой одной альтернативы всеми ВР с КСП [5].

Результаты работы вредоносных роботов представлены на рис. 3.

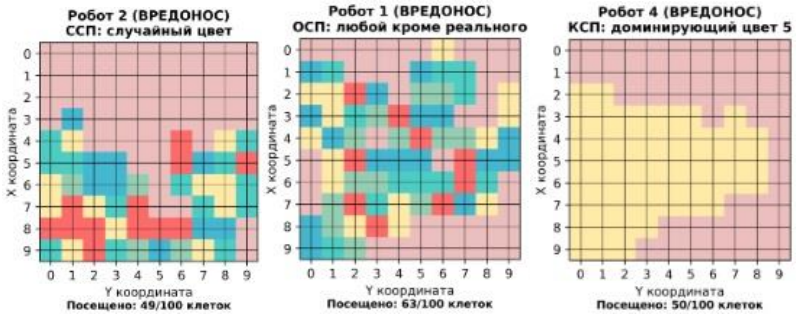


Рис. 3. Локальные карты сцены, составленные вредоносными роботами с различными стратегиями поведения – ССП, ОСП, КСП

Из рисунка 3 видно, что объединение ЛК, составленных ВР, с ЛК, составленными ИР приведет к конфликтной ситуации в случае противоречивых сведений в отношении клеток, которые посетили и ВР, и ИР. Возможна также ситуация, при которой отдельные участки сцены посетили только ВР, и это приведет к внедрению недостоверных данных в образ глобальной карты.

Для обнаружения и нейтрализации ВР предлагались методы защиты, основанные на введении метрик доверия и репутации агентов [6, 7], на основе технологий распределенного реестра [3], путем вычисления степени уверенности [3, 4] и другие подходы [7, 8]. Однако все эти механизмы оказываются не эффективными (согласно протоколам DMVD, DMMD или DC), если при голосовании в конфликтной ситуации в отношении какой-либо альтернативы число голосов ВР превышает число голосов ИР, посетивших этот участок. Такое явление называется «Атака 51 %».

Таким образом, задача состоит в разработке такого метода, который даст возможность выявлять ВР даже тем исправным роботам, которые находятся на других участках сцены и своими сенсорами не могут подтвердить

или опровергнуть поступающую через радиосеть роя информацию или дезинформацию.

В основу этого метода положено суждение, что различные участки исследуемой сцены обладают схожими статистическими характеристиками распределения цветов. Тогда каждый робот анализирует гистограммы каждого робота, и на основе принятого в рое решающего правила принимает решение, к какому классу относится тот или иной робот. Все ЛК роботов, который классификатор оценил как не относящиеся к классу ИР, из составления глобального образа сцены исключаются.

Рассмотрим гистограммы количества считанных с клеток цветов каждым роботом (рис. 4). На рисунке видно, что гистограммы, построенные на основе данных, полученных при исследовании роем сцены исправными и вредоносными роботами, имеют отличие. Если наблюдать за изменением гистограмм в течении итерационного процесса передвижения роботов, то можно оценить степень связи между гистограммами ВР и ИР. На рис. 4 приведены зависимости изменения коэффициента корреляции Пирсона для некоторых ИР и ВР с различными стратегиями поведения. Как видно на рисунках, самая низкая корреляция наблюдается между исправным роботом, и ВР, действия который осуществляются в соответствии с ОСП и КСП. Но между ИР и ВР со стратегией ССП корреляция довольно высокая.

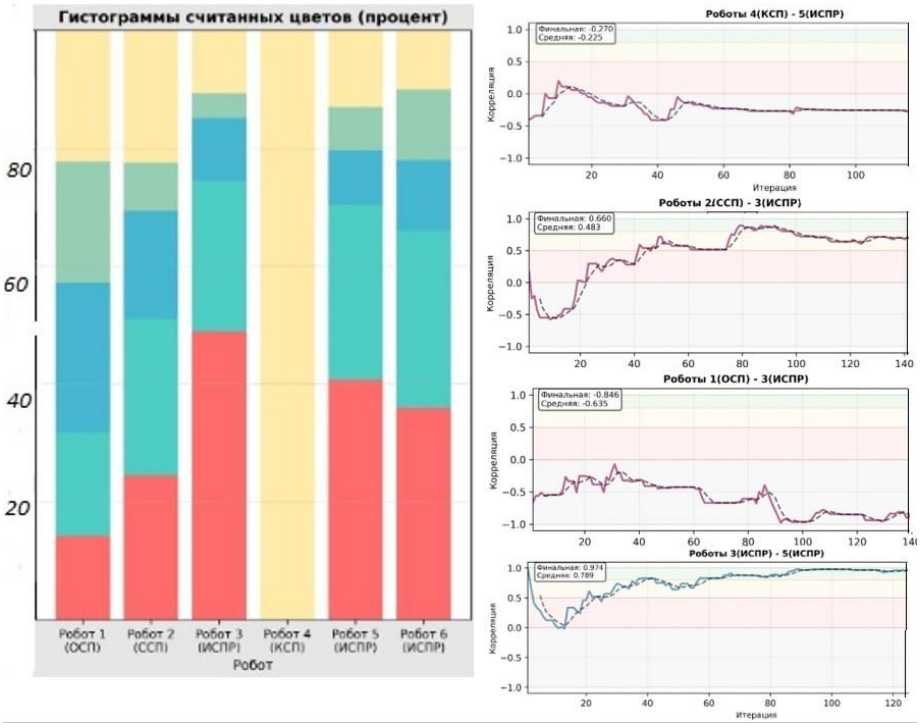


Рис. 4. Гистограммы цветов и графики зависимость коэффициентов корреляции гистограмм роботов с увеличением количества итераций

Для выполнения классификации роботов на классы ИР (класс 1), ВР с КСП (класс 2), ВР с ОСП (класс 3) и ВР с ССП (класс 4) по значениям их гистограмм использован наивный байесовский классификатор. Использование байесовского решающего правила является привлекательным решением в силу того, что оно не приводит к существенному возрастанию нагрузки на вычислительные устройства роботов [9, 10].

Для обучения наивного байесовского классификатора была составлена обучающая выборка из 200 объектов по 50 представителей каждого класса. После разметки данных и проведения численного эксперимента с использованием кросс-валидации получена следующая статистика по классам (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Детальная статистика по классам

	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
Класс 1	1,00	1,00	1,00	100%
Класс 2	0,98	1,00	0,99	100%
Класс 3	0,73	0,76	0,75	76%
Класс 4	0,74	0,70	0,72	70%

Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предположение о возможности использования статистических характеристик исследуемой сцены для обнаружения атак ВР при различных стратегиях поведения подтверждено.

2. В качестве информативных признаков для обнаружения атак ВР можно использовать гистограммы частот наблюдаемых роботами свойств исследуемой сцены.

3. Применение наивного байесовского классификатора в вычислительных устройствах роботов позволяет с высоким качеством классифицировать ИР и ВР при наличии на сцене доминирующих цветов.

Дальнейшее исследование будет направлено на изучение эффективности применения данного метода при отсутствии доминирующих цветов и различных радиусах корреляции автокорреляционной функции исследуемой сцены.

Список используемых источников

1. Valentini, G., Hamann, H., Dorigo, M.: Self-organized collective decision making: The weighted voter model. In: Proc. of the 13th Int. Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. pp. 45{52. AAMAS '14, IFAAMAS. 2014.

2. Valentini, G., Ferrante, E., Hamann, H., Dorigo, M.: Collective decision with 100 Kilobots: Speed versus accuracy in binary discrimination problems. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 30(3), 553-580. 2015.

3. Strobel, V., & Dorigo, M. Blockchain technology for robot swarms: A shared knowledge and reputation management system for collective estimation. In: Swarm Intelligence: 11th International Conference, ANTS 2018, Rome, Italy, October 29–31, 2018, Proceedings, Springer. Vol. 11172. P. 425.

4. Метод выявления вредоносных роботов на основе данных процесса коллективного принятия решений в роевых робототехнических системах // Рябцев С. С. Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 5. С. 224.

5. Использование поведенческих моделей для исследования социумов роботов // Зикратов И. А., Зикратова Т. В. Информация и космос. 2022. № 4. С. 170-174.

6. Basan A.S., Basan E.A., Makarevich O.B. Analysis of ways to secure group control for autonomous mobile robots. Proceedings of the 10th International Conference on Security of Information and Networks, 2017, pp. 134-139. DOI: 10.1145/3136825.3136879.

7. Zikratov I. A., Lebedev I. S., Kuzmich E. V., Gurtov A. V.: Securing swarm intellect robots with a police office model / В сборнике: 8th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2014 – Conference Proceedings. 2014. С. 7035906.

8. Модель безопасности мобильных робототехнических систем с коллективным управлением // Зикратов И. А., Викснин И. И., Зикратова Т. В., Шлыков А. А., Медведков Д. И. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 439-449.

9. Qihao Shan, Sanaz Mostaghim.: Discrete collective estimation in swarm robotics with distributed Bayesian belief sharing / Swarm Intelligence Swarm, 2021. PP. 378-405, 15(3). DOI: 10.1007/s11721-021-00201-w.

10. Зикратов И. А., Зикратова Т. В., Новиков Е. А. Реализация стратегии коллективного восприятия в самоорганизующейся роевой системе с использованием байесовского решающего правила // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 3. С. 108–118. (in Russ.) DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-3-108-118. EDN: XTDMRI.

A METHOD FOR DETECTING THREE TYPES OF ATTACKS ON A ROBOTIC SWARM IN A COLLECTIVE PERCEPTION PROBLEM

Zikratov I.[1], Zikratova T.[2]
[1] The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
[2] Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N. G. Kuznetsov

This paper discusses the development of defense mechanisms for mobile multi-agent robotic systems against attacks by malicious robots with three behavioral strategies. Such attacks are carried out by generating and transmitting misinformation about the environment and observed objects to swarm members, as well as through other actions that do not exhibit identifiable signs of intrusion by saboteur robots and lead to erroneous decisions during the collective perception process.

Key words: multi-agent robotic systems, collective perception, swarm intelligence, Bayesian classifier

УДК 004.891.3
ГРНТИ 81.93.29

АДАПТИВНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ УНИКАЛЬНЫМ УГРОЗАМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Д. В. Иванов, К. Г. Налимов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Постоянно растущий масштаб внедрения технологий искусственного интеллекта в различные сферы человеческой деятельности приводит к необходимости создания надежной системы защиты от деструктивных воздействий и кибератак на продукты искусственного интеллекта. Одновременно со стремительным развитием технологий искусственного интеллекта аналогично стремительно развивается область киберпреступлений, появляются принципиально новые уникальные угрозы, атаки, техники и тактики их реализации. С каждым днем растет эффективность кибератак на данные системы, что в свою очередь приводит к необходимости создания уникальной архитектуры системы кибербезопасности, позволяющей в режиме реального времени адаптироваться к появлению принципиально новых и модифицированных кибератак.

искусственный интеллект, кибербезопасность, информационная безопасность, противодействие угрозам, адаптивный метод

На сегодняшний день технологии искусственного интеллекта (далее – ИИ) являются ключевым инструментом повышения операционной эффективности и оптимизации бизнес-процессов в организации. Модели ИИ позволяют в максимально короткие сроки адаптироваться к изменениям окружающей бизнес-среды. Одновременно с колоссальным ростом операционной эффективности интеллектуальная инфраструктура предприятия теряет киберустойчивость и становиться объектов для целенаправленных кибератак, ставящих под угрозу непрерывность деятельности самого предприятия. Благодаря развитию ИИ и доступности его инструментов растет распространение противоправной информации [1].

Логическая структура предприятия, использующего в операционной деятельности технологии искусственного интеллекта, можно представить в виде системной многоуровневой модели. Можно выделить три основные уровня данной модели:

1. Базовый уровень. Уровень производственного оборудования, обеспечивающий работоспособность основных операционных процессов предприятия.

2. Технологический уровень. Уровень ИТ-инфраструктуры, аппаратное и программное обеспечение, позволяющее автоматизировать операционные процессы предприятия.

3. Инструментарный уровень. Уровень применения технологий ИИ, позволяющий значительно повысить операционную эффективность базового и технологического уровня.

Симбиоз технологий базового уровня и технологий ИИ позволяют создать «умное» адаптивное производство с высоким уровнем производственной эффективности и колоссальными возможностями для дообучения и оптимизации производственных процессов. Стек классических ИТ-технологий и технологий ИИ позволяет предприятию запустить высокоэффективные ИИ-сервисы для решения внутренних, внешних задач, размещения информационных сервисов предприятия в медиапространстве [2].

Для визуализации многоуровневой модели предприятия, использующего технологи ИИ была использована диаграмма Венна, представленная на рис. 1.

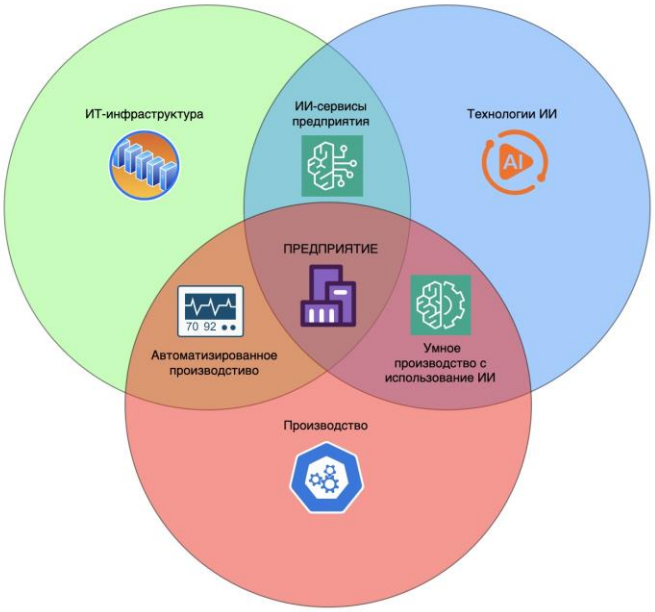


Рис. 1. Логическая структура предприятия

Ключевой парадокс успешного внедрения технологий ИИ в операционные процессы предприятия заключаются в том, что одновременно с повышением эффективности производственных и бизнес-процессов значительно увеличивается количество уникальных киберугроз, способных нарушить работоспособность предприятия и его основные процессы. Глубина интеграции технологий ИИ значительно увеличивает многомерную поверхность атаки на предприятие, приводящих к существенным деструктивным последствиям.

Интеграция технологий ИИ с классическим производственными процессами и ИТ-инфраструктурой приводит к появлению принципиально новых ИИ-сервисов и созданию «умного ИИ-производства», которые в свою очередь демонстрируют свойства эмерджентности, порождая уникальные угрозы и уязвимости не присущие отдельным компонентам системы. В случае проектирования информационных систем с применением технологий искусственного интеллекта, таких как искусственные нейронные сети, алгоритмы машинного и глубокого обучения, процессы моделирования угроз информационной безопасности значительно усложняются [3].

Таким образом для противодействия уникальным угрозам информационной безопасности [4], возникающих в следствии интеграции в операционные процессы технологий ИИ необходима система кибербезопасности адаптированная под технологические особенности предприятия и технологии ИИ, в тоже время учитывающая динамику, развитие и эволюцию киберугроз.

Методология адаптивной архитектуры кибербезопасности основывается на замкнутом цикле Колба «восприятие-анализ-действие-обучение».

Архитектура адаптивной системы кибербезопасности является замкнутым контуром, построенная на базе многослойного перцептрона (далее – MLP) с применением рекуррентных слоев «долгой краткосрочной памяти» LSTM [5], состоящая из 6 модулей и объединенная в единый контур управления через центральное ядро координации MLP, представлена на рис. 2.

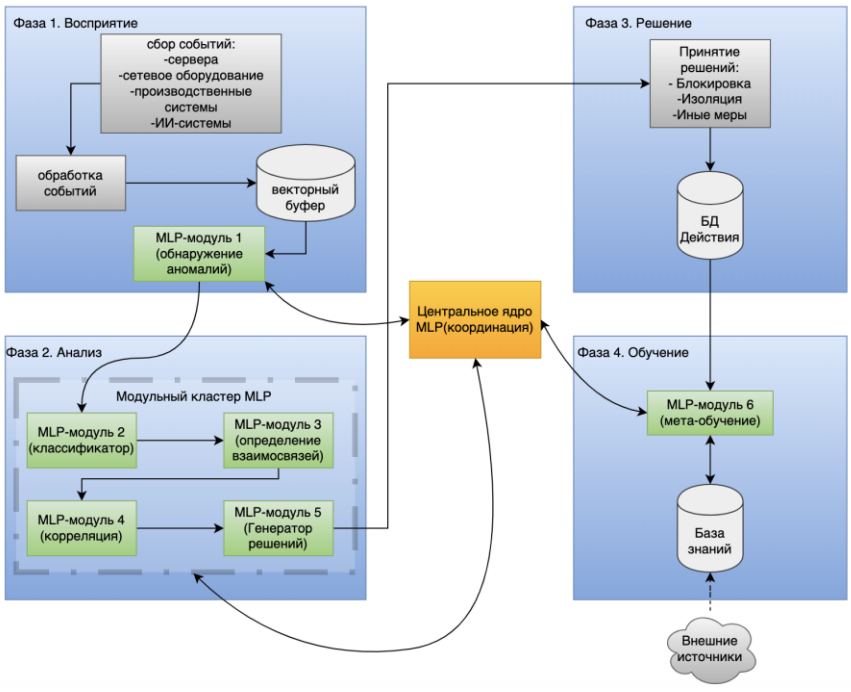


Рис. 2. Архитектура адаптивной системы кибербезопасности

Представленную архитектуру можно детализировать по четырем ключевым фазам:

Фаза 1 «Восприятие». На данной фазе происходит сбор и обработка событий средствами системы управления и мониторинга информационной безопасности с элементов ИТ-инфраструктуры предприятия, производственных систем и информационных систем с использованием ИИ. В качестве накопителя нормализованных событий, преобразованных в векторный формат, применяется векторный буфер. Буфер направляет поток данных в Модуль 1 MLP, где происходит обнаружение аномальных событий, путем обогащения предварительно обработанного события вероятностью аномалии.

Фаза 2 «Анализ». На фазе анализа происходит преобразование аномальных событий в предлагаемое вероятностное защитное решение. Данное преобразование реализовано кластером взаимосвязанных последовательных MLP-модулей. Модуль MLP 2 производит классификацию векторного события с оценкой аномалии по классам техник и атак в соответствии с базой данных MITRE ATT&CK. Модуль MLP 3 формирует скрытые вероятностные взаимосвязи между событиями, которые по отдельности могут быть классифицированы как легитимные, но в совокупности могут представлять из себя деструктивный сценарий атаки. Соответственно на вход модуля-коррелятора MLP 4 поступают обогащенные семантически связанные данные. Коррелятор MLP 4 формирует причинно-следственные конструкции для передачи в модуль генерации решений MLP 5. Модуль MLP 5 является главным компонентом кластера MLP-модулей, преобразующий набор аналитических данных в ранжированный набор управляющих воздействий.

Фаза 3 «Решение». Данная фаза является уровнем исполнения, на котором набор аналитических данных преобразуется в управляющее воздействие на киберфизическую систему предприятия [6]. Решения, генерируемые модулем MLP 5, реализуется администратором информационной безопасности системы путем выполнения корректирующего набора мер. Примененные администратором информационной безопасности действия фиксируются в базе данных «Действия», которая в дальнейшем используется как набор данных для дообучения всех MLP-модулей адаптивной системы кибербезопасности.

Фаза 4 «Обучение». Центральным компонентом системы MLP- модулей является модуль мета-обучения, который получает на вход данные о

принятых управляющих воздействиях и мерах их эффективности. Далее MLP-модуль 6 дообучает, обновляет веса и параметры предшествующих пяти MLP-модулей, что обеспечивает принципы «замкнутости» и «самообучаемости» контура кибербезопасности, за счет свойств мета-обучения MLP-модуля 6 система непрерывно адаптируется к изменяющимся, уникальным угрозам информационной безопасности. Модуль мета-обучения имеет двунаправленное взаимодействие с базой знаний, где аккумулируется опыт выявления угроз, сценариев атак и эффективных мер противодействия. Кроме того, архитектура адаптивной системы кибербезопасности позволяет реализовать интеграцию существующей базы данных накопленного опыта с внешними базами знаний, что позволяет системе проактивно реагировать на уникальные угрозы.

Центральное ядро координации MLP. Данный элемент схемы выполняет функцию системного оркестратора MLP-модулей, обеспечивая координацию потоков данных и согласованность взаимодействия, синхронизирует циклы дообучения, обновления весов и параметров MLP-модулей.

Предлагаемая адаптивная архитектура кибербезопасности может быть использована на предприятии с внедренными в производственные и операционные процессы технологиями ИИ в качестве системы противодействия уникальным угрозам, которые несет в себе примененье данных технологий.

Список используемых источников

1. Борисов С. В. Актуальность проблемы выявления сгенерированного видео с использованием технологий искусственного интеллекта в социальных сетях и цифровых медиа / С. В. Борисов // Безопасные информационные технологии Сборник трудов Тринадцатой международной научно-технической конференции Москва, 30 октября – 01 2024 года. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. С. 42-45.

2. Харитонов А. А. Противодействие продвижению нежелательной информации в медиапространстве / А. А. Харитонов, Д. В. Сахаров, С. В. Борисов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2025. Т. 15. № 1. С. 53-58.

3. Иванов Д. В. Анализ и классификация угроз информационной безопасности в системах искусственного интеллекта / Д. В. Иванов, К. Г. Налимов // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025) Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 314-319.

4. Иванов Д. В. Противодействие угрозе отравления данных систем искусственного интеллекта путем применения механизмов предварительного анализа обучающих данных / Д. В. Иванов, К. Г. Налимов // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025) Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. Санкт-Пе-

тербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 320-325.

5. Qaiser, G.; Chandrasekaran, S. Denoising Adaptive Multi-Branch Architecture for Detecting Cyber Attacks in Industrial Internet of Services. J. Cybersecur. Priv. 2026, 6, 26. https://doi.org/10.3390/jcp6010026.

6. Фатин А. Д. Построение модели адаптивности киберфизических систем: функционирование и детектирование // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 2 (60). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-modeli-adaptivnosti-kiberfizicheskih-sistem-funktsionirovanie-i-detektirovanie (дата обращения: 13.02.2026).

ADAPTIVE ARCHITECTURE OF THE CYBERSECURITY SYSTEM TO COUNTER UNIQUE THREATS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Ivanov D., Nalimov K.
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

The ever-growing scale of the introduction of artificial intelligence technologies into various spheres of human activity leads to the need to create a reliable system of protection against destructive influences and cyber-attacks on artificial intelligence products. Simultaneously with the rapid development of artificial intelligence technologies, the field of cybercrime is rapidly developing, fundamentally new unique threats, attacks, techniques and tactics of their implementation are emerging. The effectiveness of cyber-attacks on these systems is growing every day, which in turn leads to the need to create a unique cybersecurity system architecture that allows real-time adaptation to the emergence of fundamentally new and modified cyber-attacks.

Key words: artificial intelligence, cybersecurity, information security, counteraction to threats, adaptive method

УДК 004.056.5
ГРНТИ 81.93.29

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ И НАСТРОЙКИ IOT

Я. А. Ильин, Д. В. Сахаров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящее время интернет вещей стал неотъемлемой частью решений сетевой инфраструктуры. В связи с ростом необходимости внедрения сетей, содержащих умные устройства, требующие настройки параметров своей работы, возрастает необходимость обеспечить защиту такой сетевой инфраструктуры. Исследование посвящено анализу современных беспроводных технологий, применяющихся для построения сети интернета вещей, а также используемых для настройки умных устройств, являющихся частью интернета вещей. Рассматриваются беспроводные технологии, проводится качественное сравнение с учетом их применения в защищенном исполнении. В заключение приведены результаты сравнительного анализа технологических решений, сделаны выводы об их перспективах развития и областях возможного применения для защиты интернета вещей.

безопасность, информационная безопасность, радиосвязь, IoT, интернет вещей

В следствии возрастающего применения интернета вещей стали появляться новые технологии связи позволяющие осуществлять обмен информацией проще и надежнее, а также создавать более сложные сетевые архитектуры. Тем не менее, простота и удобство передачи информации имеет и обратную сторону – меньшая устойчивость к атакам и большие возможности для использования злоумышленниками. Согласно исследованиям, в 2025 году количество атак на устройства и сети IoT вырос более чем на 40% в сравнении с 2024 годом [1, 2].

Интернет вещей реализуется с использованием различных технологий связи в зависимости от навыков пользователя и требований к организации процессов обмена данными. Самыми распространенными технологиями связи являются Wi-Fi, Bluetooth и Zigbee. Эти технологии чаще всего применяют в частных домах и на их основе пользователь легко может развернуть свою IoT сеть. Технология LoRa в основном используется для удален-

ного управления беспилотными сельскохозяйственными машинами в аграрной промышленности или для работы с беспилотными летательными аппаратами. Технология NFC широко распространена, однако не так часто встречается, как компонент интернета вещей. Из-за малого радиуса действия в интернете вещей применение NFC как правило ограничено системами отслеживания сотрудников через контрольно-пропускные пункты, однако есть и другие перспективные направления применения NFC. Такими направлениями можно считать настройку устройств, считывание данных, работа неквалифицированного пользователя с IoT [3, 4]. Подробное сравнение технологий и их особенностей представлено в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. сравнение основных технологий связи, применяемых в умном доме

Технология	Средняя дальность	Пропускная способность	Основное применение	Преимущества	Недостатки
Wi-Fi	30–100 м	Высокая (10 – 100 Мбит/с)	Умный дом, видео	Высокая скорость, готовая инфраструктура	Высокое энергопотребление, ограниченный радиус
Bluetooth	1–100 м	Средняя (24 Мбит/с)	Персональные устройства	Низкое энергопотребление (BLE)	Ограниченная дальность
ZigBee	10–100 м	Низкая (250 Кбит/с)	Легкое создание IoT, ~65 000 устройств	Mesh-топология, энергоэффективность	Низкая пропускная способность
LoRa	2–15 км	Очень низкая (0.3 – 50 Кбит/с)	Умные счетчики, дроны, сельское хозяйство	Дальность, низкое энергопотребление	Низкая скорость, зависимость от базовых станций
RFID, NFC	≤5 см	Низкая (106 – 424 кбит/с)	Логистика, инвентаризаци, КПП, Бесконтактные платежи	Метки не тратят энергию, дешевизна	Малый объем данных, короткая дистанция, Риск несанкционированного подключения
Thread	10–30 м	Низкая (250 Кбит/с)	Умнный дом, промышленная автоматизация, ~65 000 устройств	Mesh-топология, IPv6-адресация, Низкое энергопотребление	Малое количество устройств в сети, низкая пропускная способность

Общую архитектуру интернета вещей можно разделить на 3 уровня: физический, сетевой и прикладной. На физическом уровне располагаются конечные устройства и периферийное оборудование (датчики, NFC метки, GPS метки, QR коды и терминалы). Технологии связи, такие как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa, NFC/RFID, Thread находятся на сетевом уровне. Последний уровень – прикладной, к нему можно отнести глобальные управляемые информационные системы, такие как транспортные системы, энергосистемы, а также «умный город». Каждый уровень имеет свои уязвимости и подвергается определенным видам атак. Для физического уровня характеры уязвимости связанные с физической ограниченностью техники и отсутствие шифрования. Самой распространенной атакой является прослушивание, хотя бывают и модернизированные версии DDoS атак или атаки с целью подмены узлов связи. На сетевом уровне основными уязвимостями являются компрометация маршрутизации и нарушение целостности данных. Для этого уровня характеры классические сетевые атаки, такие как человек посередине и спуфинг. Атаки на IoT системы на прикладном уровне осуществляются с помощью вирусного программного обеспечения, осуществляется перехват данных и подмена пользователей. Для борьбы с угрозами технологии передачи данных совершенствуются и выпускаются новые стандарты. Помимо защищенных решений, новые стандарты могут быть энергоэффективными или иметь иные технические возможности, подробнее они рассмотрены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. технологии и решения для защиты и оптимизации интернета вещей

Технология	Решения для защиты и оптимизации IoT
Wi-Fi	WPA3, VLAN, 802.1X
Bluetooth	LE Secure Connections, ECC
ZigBee	Шифрование трафика, Trust Center, использование ключей
LoRa	Двойное шифрование, OTAA, MIC
FRID, NFC	Аутентификация меток, блокировка записи меток
Thread	Шифрование трафика, использование ключей

Проведя сравнительный анализ технологий, можно сделать выводы о том, что ни одна из технологий не дает в полной мере возможностей защититься от угроз. Самым удачным решением будет использование комбинированных сетей и разделение IoT на отдельные узлы связи, в каждом из которых будет применяться конкретная технология. Особенно важный аспект обеспечения за-

щиты для интернета вещей – технические особенности выбранных технологий передачи данных [5]. Долгое время интернет вещей строился с использованием одной технологии, что ограничивало его области применения. На сегодняшний день многие сети IoT строятся с использованием модульного подхода, где сеть делятся подсети с отдельными узлы связи использующими различные технологии. В таких решениях каждая подсеть работает на подходящих для ее задач технологиях, а затем передает данные на более высокий уровень. Данный подход позволяет создавать глобальные системы интернета вещей в областях медицины, промышленности или сельского хозяйства, где конечные устройства находятся на большом удалении от центрального узла связи или не находятся с ним в постоянном контакте.

Рисунок 1 представляет сравнение инструментов настройки периферийных устройств. В дополнение к основным технологиям связи были рассмотрены механические и проводные решения настройки конечных устройств.

Характеристика	Механическая	Проводная	Bluetooth	WiFi	NFC	ZigBee	LoRa	Thread
Скорость настройки	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая	Очень высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Энергопотребление для осуществления настройки	Низкое	Высокое	Среднее	Высокое	Отсутствует	Низкое	Очень низкое	Низкое
Сложность подключения	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Очень низкая	Средняя	Высокая	Средняя
Безопасность	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая (двойное шифрование)	Высокая
Стоимость реализации	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая	Средняя	Средняя/ Высокая	Средняя
Удобство настройки	Низкое	Низкое	Среднее	Среднее	Высокое	Среднее	Низкое	Среднее/ Высокое
Совместимость с мобильным телефоном	Нет	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая	Ограниченная (нужен шлюз)	Ограниченная (нужна инфраструктура)	Высокая (IP-based, Matter)

Рис. 1. Сравнение инструментов настройки периферийных устройств

Несмотря на то, что «старые» технологии, такие как Wi-Fi или Bluetooth являются самыми защищенными, в IoT все чаще используются «молодые» технологи, такие как Zigbee, LoRa. Zigbee позволяет создавать сравнительно легко частные сети интернета вещей любителям и имеет множество решений, использующих открытые коды. Протокол Thread пока что менее распространен, однако позволяет создать большие легко управляемые IoT сети за счет mesh-топологии. Данная технология является логическим продолжением развития Zigbee и в будущем может вытеснить его из области реализаций IoT с большим количеством устройств или в случаях, где необходима mesh архитектура. NFC является специфической технологией за счет малой дальности действия. Однако технологическая особенность делает развитие NFC как инструмента

настройки устройств перспективным направлением. NFC имеется в каждом смартфоне, что убирает необходимость иметь специальный терминал для взаимодействия с конечными устройствами. Настройка «касанием» через визуально понятный интерфейс убирает необходимость настройки сетей и установления сопряжения для связи устройства и терминала. Так же становится возможна настройка компонентов интернета вещей и чтение информации с периферийных устройств неквалифицированным пользователем, что делает IoT доступным для массового потребителя. Другим преимуществом является отсутствие энергопотребления самого устройства. Питание NFC метки осуществляется за счет электромагнитного поля терминала, что будет лучшим решением для энергосберегающих устройств.

Список используемых источников

1. «Атаки носят массовый характер»: аналитический отчет по DDoS за 2025 год. URL: https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/1000940 (дата обращения: 01.03.2026).

2. Статистика недели от «Кибербастион»: IoT-угрозы 2025. URL: https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/1000940 (дата обращения: 01.03.2026).

3. Asia O., Maria J., Jana B., Talah F. Detecting Wireless Relay Attacks in NFC Using Deep-Learning. URL: oajaiml.com›uploads/archivepdf/143154264.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

4. Грохольский А. В., Ильин Я. А., Ковцур М. М. Разработка концепции устройства с модулем конфигурирования на базе технологии NFC // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т. Санкт-Петербург, 2024. С. 260-262.

5. Караев А. С., Бирих Э. В., Сахаров Д. В., Виткова Л. А. Проблемы информационной безопасности в интернете вещей // 2-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет вещей и 5G» (INTHITEN 2016). С. 66-70.

RESEARCH ON WIRELESS TECHNOLOGIES FOR IOT MANAGEMENT AND CONFIGURATION SECURITY

Ilin Y., Saharov D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Currently, the Internet of Things has become an integral part of network infrastructure solutions. Due to the growing need to introduce networks containing smart devices that require configuration of their operation parameters, there is an increasing need to ensure the protection of such a network infrastructure. The study is devoted to the analysis of modern wireless technologies used to build the Internet of Things network, as well as used to configure smart devices that are part of the Internet of Things. Wireless technologies are considered, and a qualitative comparison is carried out, taking into account their application in a secure design. In conclusion, the results of a comparative analysis of technological solutions are presented, conclusions are drawn about their development prospects and areas of possible application for the protection of the Internet of Things.

Key words: security, information security, radio communications, IoT, Internet of Things

УДК 004.056
ГРНТИ 81.93.29

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПО НЕЯВНОЙ СХЕМЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТА КИИ

Н. Н. Киселев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается алгоритмическая реализация методики динамической оценки защищенности объектов критической информационной инфраструктуры, основанной на неявной схеме вычислений. В качестве ядра математической модели используется уравнение баланса с обратной связью между интегральной оценкой системы и весовыми коэффициентами локальных показателей. Подробно описан итерационный алгоритм решения данного уравнения методом Ньютона, включая построение функций агрегации и адаптации весов, а также работу с многомерными данными через матрицу Якоби. Приводятся результаты имитационного моделирования, демонстрирующие устойчивость, сходимость и адаптивность алгоритма в условиях плановых изменений, инцидентов безопасности и эволюции нормативных требований. Показана практическая применимость подхода для автоматизации процессов аттестации и мониторинга защищенности КИИ.

информационная безопасность, неявная схема, алгоритм расчета, метод Ньютона, критическая информационная инфраструктура, оценка защищенности, динамическая балансировка, обратная связь, матрица Якоби

Введение

Современные объекты критической информационной инфраструктуры представляют собой сложные иерархические системы, оценка защищенности которых требует учета взаимосвязей между различными уровнями (организационным, объектным, платформенным). Традиционные методы, основанные на статических моделях и экспертных оценках, не способны оперативно адаптироваться к изменяющемуся ландшафту угроз и ужесточающимся нормативным требованиям [1-3]. Их основной недостаток – отсутствие механизма динамической балансировки оценок между уровнями иерархии, что приводит к фрагментарным и субъективным результатам.

Развитием ранее предложенной модели декомпозиции требований [4, 5] является переход к динамической балансировке с использованием неяв-

ной схемы вычислений. Суть подхода заключается в отказе от жесткой линейной формулы расчета интегральной оценки в пользу решения уравнения, в котором сама оценка и веса локальных показателей находятся в состоянии взаимозависимости и баланса. Это создает систему с обратной связью, способную к самообучению и адаптации.

Научные работы в схожих направлениях вели такие ученые как Билятдинов К. З., Красов А. В., Душин С. Е., Яковлев В. Б. Ерохин С. Д., Петухов А. Н., Пилюгин П. Л., Месарович М. и другие. Ерохин сделал большой вклад в развитие научных знаний в области управления безопасностью критических информационных инфраструктур [6]. Красов рассматривал вопросы инновационного управления рисками информационной безопасности [7, 8]. Билятдинов и Душин занимались развитием и практическим осмыслением в целях использования в прикладных задачах теории Месаровича [9]. Тот факт, что научное сообщество делает шаги к разрешению смежных задач и затрагиваемой проблематике, свидетельствует об актуальности проведенного исследования.

Целью данной статьи является детальное описание алгоритма расчета, реализующего неявную схему для формирования устойчивой и адаптивной оценки защищенности объекта КИИ. Акцент делается на математическую формализацию, вычислительные аспекты и практическую реализацию итерационного процесса. В ходе исследования ставится задача выполнения подтверждения корректности направления проведенных ранее расчетов. Также целесообразно уточнить полученные ранее результаты и дать комментарии, связанные с упрощением модели и приближениями сделанным в практической реализации вычислений.

Постановка задачи и формализация модели. Исходной точкой является модель декомпозиции требований, в которой общие требования безопасности разбиваются на атомарные, бинарно проверяемые утверждения, распределенные по уровням иерархии. Далее возникает задача динамического согласования.

$$Y_{global}(t) = F\big(y_{local}(t)\,, W(Y_{global}(t))\big).$$

Переменные в формуле имеют следующий смысл:

$Y_{global}(t)$ – интегральная оценка в день t; $y_{local}(t) = [y1(t), \dots, yn(t)]$ – вектор локальных оценок; $W = [w1, \dots, wn]$ – вектор весов, зависящих от Y_{global}; F – функция агрегации (взвешенная сумма).

Для целей исследования возьмем исходные данные, полученные в результате предыдущих исследований [3-5, 10-12]. Для каждого дня t мы имеем вектор показателей $y(t)=[y1(t),y2(t),...,yn(t)]y(t)=[y1(t),y2(t),...,yn(t)]$, где n = 8 (дни 1-20), n = 9 (дни 21-30).

Опираясь на полученные результаты, сформирован исходный вектор $y_{local}\ (t) = \ [0.8, 0.6, 0.7, 0.5, 0.4, 0.6, 0.7, 0.4]$ для проверки и дальнейшего использования в алгоритме расчета.

Веса для оценок на начальном этапе задаются экспертом на основании опыта. При этом на первом шаге они могут в сумме и не давать единицу, то есть не быть номерованы. Этот факт обусловлен тем, что схема балансировки на следующем шаге их скорректирует. Такой подход позволяет при назначение экспертной оценки весам на первом шаге действовать приближенно, не учитывая фактор нормализации и не подбирать веса таким образом, чтобы они в сумме давали единицу. Это обстоятельство существенно упрощает задачу эксперту и позволяет сосредоточиться на главном – учете влияния факторов, не тратя при этом время на расчет самой величины их влияния.

В алгоритме расчета используется функция агрегации

$$F(y, W) = \ \sum_{i=1}^{n} w_i \times \ y_i.$$

При этом расчет весов зависит от Y_{global} (функция адаптации)

$$w_i(Y) = \ \frac{K_i(Y)}{\sum_{j=1}^{n} K_j(Y)}.$$

Расчет коэффициента важности производится по формуле

$$K_i(Y) = \ max\left(0.05, (1 - y_i(t) + \alpha \times \frac{y_i(t-1) - y_i(t)}{y_i(t-1)} + \beta \times (Y - Y_{target})\right).$$

В расчетах использованы следующие параметры: α = 0.3 – чувствительность к изменениям показателей; β = 0.1 – влияние общей оценки на веса; Y_{target} = 1.0 – целевое значение; n – количество критериев = (8 для дней 1–20, 9 для дней 21–30); 0.05 – значение, которое не позволит какому-либо критерию исчезнуть, он будет иметь минимальную важность .

Приведем подробнее решения неявного уравнения через метод Ньютона.

Уравнение $Y = \Phi(Y)$, где $\Phi(Y) = \ \sum_{i=1}^{n} y_i(t) \times \ w_i(Y)$ решается итерационно. Итерационный процесс имеет вид:

$$Y^{k+1} = Y^k - \frac{F(Y^k)}{F'(Y^k)},$$

где $F(Y) = 1 - \Phi(Y)$ и $F'(Y) = 1 - \Phi'(Y)$.

Производная соответственно вычисляется как

$$\Phi'(Y) = \frac{\beta}{S(Y)}\left(\sum_{i=1}^{n} y_i(t) - n \times \Phi(Y)\right),$$

а сумма вычисляется следующим образом:

$$S(Y) = \sum_{i=1}^{n} K_i(Y).$$

Здесь также следует отметить, что k в формуле это не степень, а шаг итерации.

Для иерархических систем матрица Якоби часто является разреженной, так как не все компоненты напрямую влияют друг на друга. Это позволяет применять высокоэффективные алгоритмы для разреженных матриц (например, методы сопряженных градиентов или специализированные библиотеки), что критично для производительности при работе с большим количеством показателей [8, 9, 12].

Для связи приведенных расчетов с фундаментальной математикой и унификации возможностей вычисления продемонстрируем связь с матричным уравнением

$$(I - h\beta J) \times \Delta y = -F(y).$$

Для скалярного случая имеем: *I*==1, *h*=1 (шаг по времени); *J=F'(Y)* – производная (матрица Якоби размера 1×1); $\Delta Y = Y^{k+1} - Y^k$.

Таким образом, становится очевидно, что $h\beta J = \beta \mathrm{F}'(Y)$. В свою очередь это коэффициент входит в знаменатель итерации Ньютона, обеспечивая устойчивость и сходимость.

Теперь пошагово изложим алгоритм расчета для дней t>1.

У нас есть входные данные:

– текущие значения $y_i(t)$;
– предыдущие значения $y_i(t-1)$;
– предыдущая интегральная оценка $Y_{global}(t-1)$.

Итерационные процесс будет выглядеть следующим образом:

– начальное приближение $Y^0 = Y_{global}(t-1)$;
– далее для k = 0, 1, 2… нужно вычислить:

1. $K_i^k = \max\left(0.05, (1 - y_i(t) + \alpha \times \frac{y_i(t-1) - y_i(t)}{y_i(t-1)} + \beta \times (Y^k - Y_{target})\right)$.

2. $S^k = \sum_{i=1}^{n} K_i^k$.

3. $w_i^k = \frac{K_i^k}{S^k}$.

4. $\Phi(Y^k) = \sum_{i=1}^{n} y_i(t) \times w_i^k$.

5. $F(Y^k) = Y^k - \Phi(Y^k)$.

6. Вычислить производные $\Phi'(Y) = \frac{\beta}{S(Y)}\left(\sum_{i=1}^{n} y_i(t) - n \times \Phi(Y^k)\right)$

$F'(Y^k) = 1 - \Phi'(Y^k)$.

7. Вычислить новое приближение $Y^{k+1} = Y^k - \frac{F(Y^k)}{F'(Y^k)}$.

8. Проверить точность вычисления $\left|Y^{k+1} - Y^k\right| < \varepsilon$, где $\varepsilon = 0.001$ и остановиться в случае достижения или превышения заданной точности.

9. В результате получим $Y_{global}(t) = Y^{k+1}$, $w_i(t) = w_i^{k+1}$.

Расчет относительного изменения вычисляется по формуле

$$\Delta Y = \frac{Y_{global}(t) - Y_{global}(1)}{Y_{global}(1)} \times 100\%.$$

ТАБЛИЦА 1. Расчеты весов и глобальной оценки

День	Yglobal	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	∑w
1	0.5875	0.114	0.114	0.114	0.114	0.159	0.114	0.114	0.159	–	1.000
4	0.619	0.110	0.090	0.110	0.150	0.180	0.120	0.110	0.130	–	1.000
6	0.673	0.108	0.088	0.108	0.145	0.140	0.125	0.108	0.178	–	1.000
8	0.701	0.106	0.086	0.106	0.140	0.135	0.120	0.106	0.201	–	1.000
12	0.648	0.104	0.084	0.104	0.135	0.130	0.190	0.104	0.149	–	1.000
13	0.603	0.102	0.082	0.180	0.130	0.125	0.185	0.102	0.094	–	1.000
17	0.742	0.100	0.080	0.120	0.125	0.120	0.120	0.100	0.235	–	1.000
21	0.704	0.095	0.075	0.110	0.120	0.115	0.115	0.095	0.100	0.170	1.000
26	0.751	0.090	0.070	0.105	0.115	0.110	0.110	0.090	0.095	0.215	1.000
28	0.769	0.085	0.065	0.100	0.110	0.105	0.105	0.085	0.090	0.255	1.000

В целях соответствия предшествующей работе следует пояснить изложенные в таблице 1 результаты вычислений. Значение глобальной оценки для первого дня было вычислено как среднее арифметическое исходных значений. Веса для первого дня нормированы так, чтобы сумма равнялась

единице. Исходные экспертные веса поделены на их сумму, а затем уже просуммированы.

Для последующих дней значения весов и оценки рассчитаны по описанному алгоритму с параметрами α = 0.3, β = 0.1.

Можно заметить, что значения оценок несколько отличаются от табличных значений предыдущей работы (0.59, 0.64, …). Это связано с округлениями и соответственно упрощенным вычислением. При этом продемонстрировано, что сохраняется общая динамику и логика адаптации.

Математически логика адаптации качественно выражена в элементах формул.

Улучшение показателя, то есть, когда $y_i(t) > y_i(t-1)$ происходит через слагаемое $\alpha(y_i(t-1) - y_i(t))$. Если оно отрицательное, соответственно K_i уменьшается, и за ним уменьшается w_i. И наоборот ухудшение показателя $y_i(t) < y_i(t-1)$ получается за счет того, что слагаемое $\alpha(y_i(t-1) - y_i(t))$ положительное. За этим следует повышение K_i и вес w_i также увеличивается.

Влияние общей оценки Y_{global} происходит через слагаемое $\beta(Y - Y_{target}$. При низкой Yвсе K_i увеличиваются. Происходит акцентирование внимания на проблемах. При высокой – уменьшаются, происходит равномерное распределение.

Таким образом, модель реализует динамическую балансировку: веса автоматически перераспределяются в зависимости от текущего состояния системы и тенденций изменения показателей.

Заключение

В работе детально описан и обоснован алгоритм расчета оценки защищенности объекта КИИ, основанный на неявной схеме вычислений. Алгоритм, базирующийся на решении уравнения баланса методом Ньютона, обеспечивает динамическую балансировку между локальными показателями и интегральной оценкой системы. За счет введения функций агрегации и адаптации весов реализуется устойчивая обратная связь, придающая модели свойства адаптивности и самообучения.

Имитационное моделирование подтвердило работоспособность алгоритма, его устойчивость к аномалиям в данных и способность плавно адаптироваться к изменяющимся условиям. Результаты применения алгоритма вычисления по неявной схеме вычисления подтвердили корректность

направления проведенных ранее расчетов. Уточненные результаты вычислений позволили верифицировать динамику и логика адаптации модели.

Развитие алгоритма в направлении работы с многомерными данными и разреженными матрицами открывает перспективы для его применения к оценке сложных, распределенных объектов КИИ в реальном времени. Предложенный подход представляет собой математическую основу для создания интеллектуальных систем поддержки управления информационной безопасностью критически важных объектов.

Список используемых источников

1. О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 1 мая 2022 г. № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации»: Указ Президента Рос. Федерации от 13.06.2024 № 500 // Официальный интернет-портал Президента России. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50714 (дата обращения: 17.01.2026).

2. Требования о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах...: Приказ ФСТЭК России от 11.04.2025 № 117 // ФСТЭК России: [сайт]. URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/trebovaniya-utverzhdeny-prikazom-fstek-rossii-ot-11-aprelya-2025-g-n-117 (дата обращения: 19.01.2026).

3. Киселев Н. Н., Красов А. В. Требования защищенности объекта КИИ с учетом развития требований регуляторов // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. СПб.: СПОИСУ, 2025. Вып. 15. С. 162–165.

4. Киселев Н. Н. Методика оценки общесистемных требований на основе модели декомпозиции требований защищенности критически важной инфраструктуры... // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2025. № 2. С. 12–18.

5. Киселев Н. Н. Модель декомпозиции требований оценки защищенности объекта КИИ по функциональному назначению // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025.

6. Ерохин С. Д., Петухов А. Н., Пилюгин П. Л. Управление безопасностью критических информационных инфраструктур. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. 240 с.

7. Билятдинов К. З., Красов А. В., Меняйло В. В. и др. Теория информационных процессов и систем. СПб.: Астерион, 2019. 144 с.

8. Душин С. Е., Красов А. В., Кузьмин Н. Н., Яковлев В. Б. Синтез структурно-сложных нелинейных систем управления: Системы с полиномиальными нелинейностями. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 371 с.

9. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем / под ред. И. Ф. Шахнова. М.: Мир, 1973. 344 с.

10. Киселев Н. Н. Метод автоматизации процедуры аттестации объектов критической информационной инфраструктуры в удаленных регионах России // Вопросы защиты информации. 2025. № 1 (148). С. 53–58. DOI: 10.52190/2073-2600_2025_1_53.

11. Киселев Н. Н. Декомпозиция требований оценки защищенности объекта КИИ по функциональному назначению // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025): материалы XIV Санкт-Петерб. межрегион. конф. СПб.: СПОИСУ, 2025. С. 478–480.

12. Киселев Н. Н. Методика оценки объекта КИИ с учетом сформированных оценок вышестоящих (общесистемных) уровней иерархии, формируемой по неявной схеме // Защита информации. Инсайд. 2026. № 1. С. 22–28.

APPLICATION OF THE CALCULATION ALGORITHM ACCORDING TO THE IMPLICIT CALCULATION SCHEME TO FORM A SECURITY ASSESSMENT OF A CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE FACILITY

Kiselev N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article discusses the algorithmic implementation of a dynamic security assessment methodology for critical information infrastructure facilities based on an implicit calculation scheme. The core of the mathematical model is a balance equation with feedback between the integral system assessment and the weighting coefficients of local indicators. An iterative algorithm for solving this equation using Newton's method is described in detail, including the construction of aggregation and weighting functions, as well as working with multidimensional data using the Jacobian matrix. Simulation results are presented demonstrating the stability, convergence, and adaptability of the algorithm under conditions of planned changes, security incidents, and evolving regulatory requirements. The practical applicability of the approach for automating the certification and monitoring of critical information infrastructure security is demonstrated.

Key words: information security, implicit scheme, calculation algorithm, Newton's method, critical information infrastructure, security assessment, dynamic balancing, feedback, Jacobian matrix

УДК 004.056.55
ГРНТИ 81.93.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТРИЧНОГО ПРОТОКОЛА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ С СОВМЕЩЕННОЙ ПРОЦЕДУРОЙ ПРЕИМУЩЕСТВЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ КАНАЛОВ

В. И. Коржик, А. С. Лапшин, В. А. Яковлев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследуется матричный протокол распределения ключей по открытым каналам связи с добавлением искусственного шума. Предложена модификация алгоритма, основанная на совмещении процедуры обмена матрицами и мажоритарного декодирования с жестким критерием отбора блоков. При помощи имитационного моделирования протокола был проведен сравнительный анализ изначального и предложенного протокола, были выявлены ограничения и показаны преимущества предложенного протокола. Показано, что данном протоколе обеспечивается преимущество легального пользователя над нарушителем по вероятности ошибки на бит в более широком диапазоне искусственного шума.

информационная безопасность, распределение ключей, матричный протокол, открытые каналы связи, искусственный шум

Проблема распределения криптографических ключей по открытым каналам связи остается одной из центральных задач современной информационной безопасности. В условиях роста вычислительных мощностей и угрозы появления квантовых компьютеров особую актуальность приобретают методы, стойкость которых не зависит от криптографических предположений (information-theoretic security) и концепции безопасности физического уровня [1, 2]. К таким методам относятся протоколы, основанные на коррелированных случайных величинах, в частности – матричные протоколы распределения ключей [3, 4].

Классическая схема матричного протокола предполагает многоэтапную процедуру: формирование «сырого» ключа (ФСК), за которым следуют итерации протокола преимущественного улучшения основного канала (ПУОК) и процедура согласования (reconciliation). Существенным недостатком такого подхода является высокая избыточность передаваемых данных и, как следствие, ограниченная скорость выработки итогового ключа.

В настоящей работе рассматривается модификация базового алгоритма – совмещенный протокол преимущественного улучшения основного канала (далее – ПУОК-с). Основная идея модификации заключается в интеграции этапа мажоритарного декодирования непосредственно в процедуру обмена матрицами. Целью работы является сравнительный анализ эффективности ПУОК-с и классического матричного протокола по критериям вероятности ошибки и скорости генерации ключевой последовательности. Полная схема протокола ФСК и ПУОК представлена на рисунке 1.

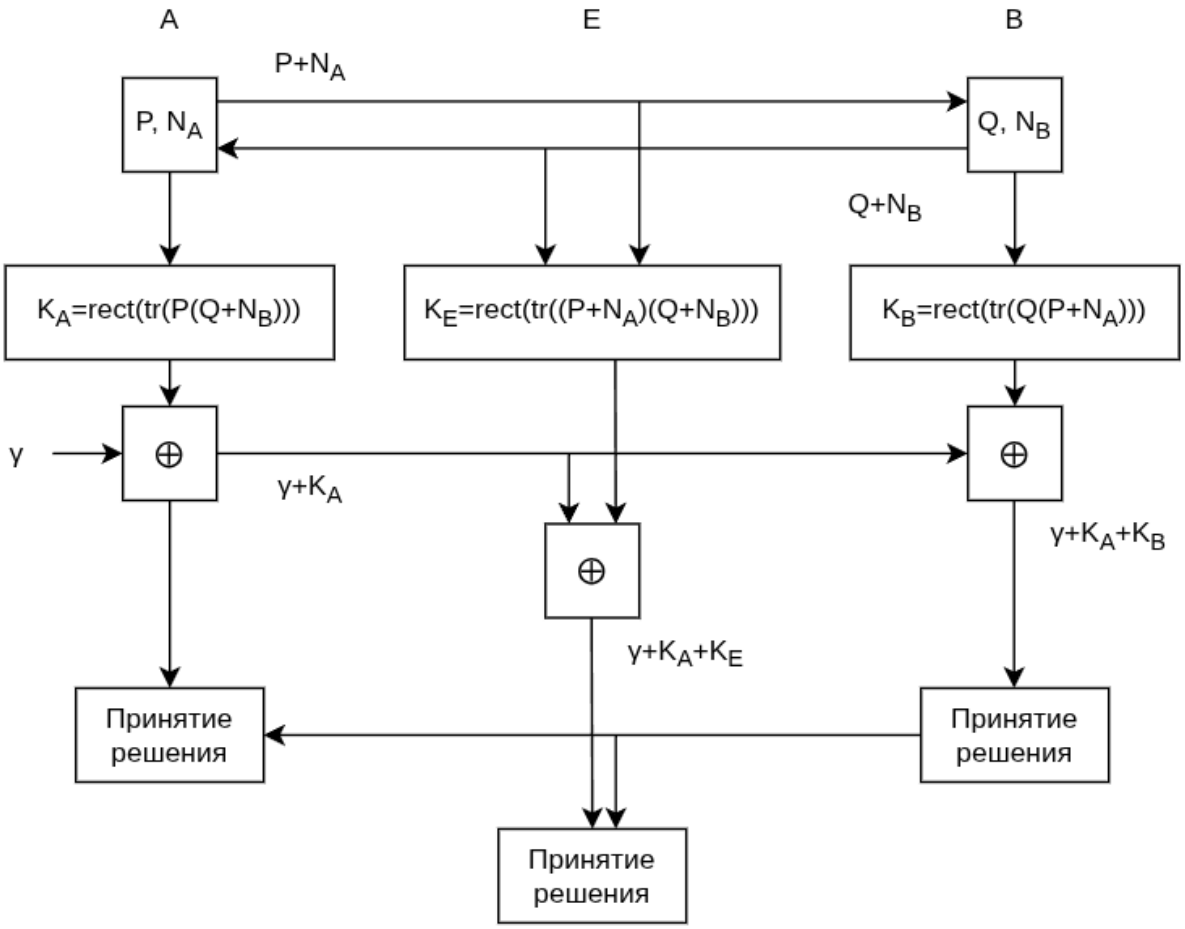


Рис. 1. Структурная схема выполнения протоколов ФСК и ПУОК

Для оценки эффективности предлагаемой модификации необходимо рассмотреть классический алгоритм. Процедура начинается с формирования сырого ключа (ФСК).

Легальные пользователи A и B генерируют секретные квадратные матрицы P и Q размера $n \times n$, элементы которых являются независимыми случайными величинами, имеющими стандартное нормальное распределение:

$$p_{ij}, q_{ij} \sim N(0,1)$$

Далее пользователи независимо генерируют матрицы шума N_A и N_B, элементы которых также распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ:

$$n_{A,ij}, n_{B,ij} \sim N(0, \sigma^2).$$

Пользователи обмениваются между собой зашумленными матрицами по открытому каналу:

$$\tilde{P} = P + N_A,$$
$$\tilde{Q} = Q + N_B.$$

После обмена пользователи вычисляют значения следов произведений своей секретной матрицы на принятую матрицу партнера:

$$k_A = tr(\tilde{Q}P) = tr\big((Q + N_B)P\big),$$
$$k_B = tr(\tilde{P}Q) = tr\big((P + N_A)Q\big).$$

Бит сырого ключа K формируется путем квантования полученного значения следа:

$$K = \begin{cases} 1, & если\, k \geq 0 \\ 0, & если\, k < 0 \end{cases}\Big).$$

После формирования цепочки сырых бит применяется процедура ПУОК для исправления ошибок и усиления секретности. Алгоритм работы одной итерации ПУОК для блока длины S:

1. Пользователь А генерирует случайный маскирующий бит γ.

2. Пользователь А применяет код повторения, выполняя сложение по модулю 2 бита γ с каждым битом своего блока сырого ключа длины S.

3. Полученную последовательность пользователь А передает пользователю В по открытому каналу.

4. Пользователь В складывает принятую последовательность со своим блоком сырого ключа.

5. Пользователь В анализирует результат сложения:

– если результирующий блок содержит и нули, и единицы, блок считается ненадежным и отбрасывается (стирается) обоими пользователями, сообщая по обратной связи;
– если результирующий блок состоит только из единиц, пользователь В декодирует бит как «1», и если только из нулей, как «0»;
– нарушитель декодирует блок $k_B = \mathrm{tr}\big((P + N_A)(Q + N_B)\big)$, основываясь на мажоритарном алгоритме.

В отличие от ранее исследуемого протокола, в протоколе ПУОК-с используется избыточность на этапе передачи матричных блоков.

Алгоритм работы протокола ПУОК-с выглядит следующим образом (рис. 2):

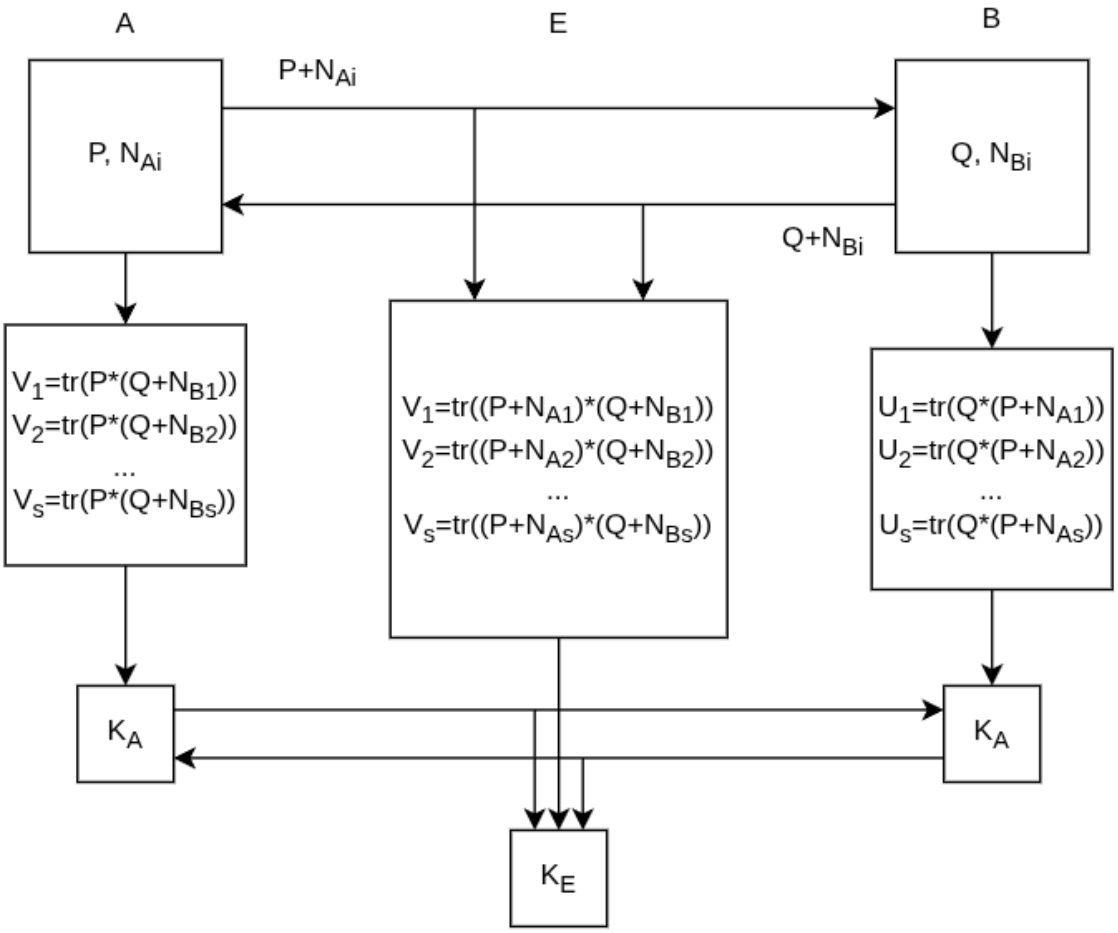


Рис. 2. Структурная схема выполнения протокола ПУОК-с

1. Легальные пользователи A (Алиса) и B (Боб) генерируют секретные случайные матрицы P и Q соответственно размера $n \times n$.

2. Пользователь A генерирует s матриц шума $N_A^{(i)}$ (где $i = 1 \dots s$) и формирует пакет зашумленных матриц $\hat{P}^{(i)} = P + N_A^{(i)}$, который передает пользователю B.

3. Аналогично пользователь B генерирует s матриц шума $N_B^{(i)}$ и передает пользователю A пакет матриц $\hat{Q}^{(i)} = Q + N_B^{(i)}$.

4. После обмена пользователи вычисляют значения следов произведений принятых матриц на свои секретные матрицы.

5. Пользователь A вычисляет набор значений:

$$V_{(i)} = tr\left(Q^{(i)} \times P\right) = tr\left(\left(Q + N_B^{(i)}\right) P\right).$$

6. Пользователь B вычисляет набор значений:

$$U_{(i)} = tr\left(P^{(i)} \times Q\right) = tr\left(\left(P + N_A^{(i)}\right) Q\right).$$

Полученные последовательности вещественных чисел $\{V_i\}$ и $\{U_i\}$ проверяются на однородность знаков. Если в наборе пользователя (A или B) присутствуют значения разных знаков (и положительные, и отрицательные), блок считается ненадежным, и отправляется сигнал стирания.

Легальный пользователь A принимает решение в соответствии со следующим правилом:

$$K_A = \begin{cases} 1, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(V_i) = s, \\ 0, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(V_i) = -s, \\ \text{стирание, иначе,} \end{cases}$$

где $\text{sgn}(V_i)$ – операция извлечения знака величины.

И соответственно для пользователя B:

$$K_B = \begin{cases} 1, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(U_i) = s, \\ 0, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(U_i) = -s, \\ \text{стирание, иначе.} \end{cases}$$

Нарушитель E, перехватывающий сообщения в канале, имеет доступ только к произведениям зашумленных компонент $P^{(i)}Q^{(i)}$, в то время как легальные пользователи извлекают полезный сигнал из произведений вида $P^{(i)}Q$ и $PQ^{(i)}$:

$$b_E = \begin{cases} 1, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(W_i) > 0, \\ 0, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(W_i) < 0, \\ \xi, \text{если} \sum_{i=1}^{s} \text{sgn}\,(W_i) = 0, \end{cases}$$

где ξ – случайный бит (равновероятный выбор 0 или 1 в случае неопределенности), а $W_i = \text{tr}(P^{(i)} \times Q^{(i)})$.

Как было показано в [5], для успешного распределения ключей необходимо условие $P_m < P_e$, где P_m – вероятность ошибки легального пользователя в основном канале, а P_e – вероятность ошибки нарушителя в отводном канале.

Протокол функционирует в открытом бесшумном канале связи. Источником неопределенности для нарушителя является искусственный гауссовский шум, добавляемый пользователями к матрицам. Моделирование проводилось на выборке 10^8 итераций.

Для обоснования необходимости модификации протокола был проведен анализ эффективности ПУОК [3] в широком диапазоне параметров шума.

В таблице 1 приведены вероятности ошибок легального пользователя (P_m) и нарушителя (P_e) для базового протокола при использовании мажоритарного блока длины $s = 3$ и $s = 5$. Данные получены для размерностей матриц $n \in \{4,16\}$ в зависимости от дисперсии шума σ^2.

ТАБЛИЦА 1. Вероятности ошибок легального пользователя и нарушителя при использовании протокола ПУОК

n	σ^2	$P_m(s=3)$	$P_e(s=3)$	$P_m(s=5)$	$P_e(s=5)$
4	0.1	0.0041	0.0052	0.0001	0.0004
4	0.2	0.0121	0.0130	0.0006	0.0014
4	0.4	0.0349	0.0323	0.0039	0.0055
16	0.1	0.0039	0.0052	0.0001	0.0010
16	0.2	0.0118	0.0128	0.0018	0.0027
16	0.4	0.0335	0.0322	0.0035	0.0056

Анализ данных показывает существенное ограничение базового протокола: при возрастании уровня шума вероятность ошибки легального пользователя начинает превышать вероятность ошибки нарушителя. В частности, для $n = 16$ и $s = 3$ имеем $P_m \approx 0.0335$, тогда как $P_e \approx 0.0322$. При других значениях преимущество легального пользователя над нарушителем часто не является существенным и из-за низких вероятностей ошибки нарушителя это сложно применить в реальной ситуации.

Для подтверждения эффективности предложенного подхода было проведено его моделирование и анализ статистических характеристик для различных параметров D, σ, n, рассматривался сценарий с размерностью матриц $n = 16$ и высоким уровнем искусственного шума ($\sigma \approx 0.63$, что соответствует дисперсии $D \approx 0.4$) для наглядного сравнения со случаем, когда условие стойкости канала $P_m < P_e$ не выполнялось (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Вероятности ошибок легального пользователя и нарушителя при использовании протокола ПУОК-с

n	σ	$P_m(s=3)$	$P_e(s=3)$	$P_m(s=5)$	$P_e(s=5)$
4	0.1	0.0019	0.0064	0.0001	0.0018
4	0.2	0.0043	0.014	0.0003	0.0042
4	0.4	0.0103	0.0333	0.0006	0.011
16	0.2	0.004	0.0134	0.0002	0.0036
16	0.4	0.0335	0.0322	0.0035	0.0056
16	0.63	0.0205	0.0614	0.0054	0.0226

Анализ данных позволяет сделать выводы, что использование протокола ПУОК-с позволяет обеспечить необходимое условие секретности $P_m < P_e$ в области высоких значений искусственного шума. Предложенный метод обеспечивает уверенное преимущество легального пользователя при $P_m \approx 0.0205$, в то время, как ошибка нарушителя составляет $P_e \approx 0.0614$. Это позволяет выбирать более высокий уровень искуственного шума. Увеличение длины блока мажоритарного декодирования приводит к существенному снижению ошибки легального пользователя, при этом соотношение ошибок P_e/P_m растет, что свидетельствует о повышении надежности формирования ключа.

Список используемых источников

1. Maurer U. Secret key agreement by public discussion from common information // IEEE Transactions on Information Theory. 1993. Vol. 39, Iss. 3. P. 733–742.

2. Dean T., Goldsmith A. Physical layer cryptography through massive MIMO // Proceedings of 2013 IEEE Information Theory Workshop (ITW). 2013. P. 1–5.

3. Yakovlev V., Korzhik V., Akhmetsina M. [et al.]. Key Sharing Protocol Using Exchange by Integers over Public Noiseless Channels Between Users that Provides Security executing without Cryptographic Assumption // The 31st Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2022. P. 363–379.

4. Korzhik V., Starostin V., Yakovlev V. [et al.]. Information Theoretically Secure Key Sharing Protocol Executing with Constant Noiseless Public Channels // Математические вопросы криптографии. 2021. Т. 12, № 3. С. 31–47.

5. Yakovlev V., Korzhik V., Starostin V. [et al.]. Channel Traffic Minimizing Key Sharing Protocol Intended for the Use over the Internet and Secure without any Cryptographic Assumption // The 32nd Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2022. Vol. 32. P. 300–307.

EFFICIENCY ALANYSIS OF A MATRIX KEY DISTRIBUTION PROTOCOL WITH A COMBINED ADVANTAGEOUS CHANNEL IMPROVEMENT PROCEDURE

Korzhik V., Lapshin A., Yakovlev V.
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication

This paper analyzes a matrix key distribution protocol with artificial noise over public channels. We propose a modified algorithm combining matrix exchange with majority decoding using a hard selection criterion. Simulation results compare the original and proposed methods, revealing the latter's advantages and limitations. It is demonstrated that the modified protocol provides the legitimate user with a superior Bit Error Rate advantage over an eavesdropper across a wider range of noise levels.

Key words: information security, key distribution, matrix protocol, public communication channels, artificial noise

УДК 004.056
ГРНТИ 81.93.29

ПОДХОДЫ К ТЕСТИРОВАНИЮ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А. А. Космачев, И. В. Котенко

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Тестирование на проникновение является актуальной задачей, направленной на обеспечение безопасности информационных систем. Ее автоматизация позволяет повысить эффективность тестирования и увеличить число обнаруженных уязвимостей. Последние достижения в области искусственного интеллекта позволили значительно повысить эффективность тестирования на проникновение. В работе представляются ключевые направления исследований по автоматизации тестирования на проникновение с применением методов искусственного интеллекта, рассматриваются основные тенденции, связанные с этим направлением исследований в зависимости от степени развития технологий искусственного интеллекта, а также описываются имеющиеся ограничения и направлениях будущих исследований.

автоматизация, тестирование на проникновение, методы искусственного интеллекта, информационная безопасность

Тестирование на проникновение является одним из наиболее эффективных способов оценивания защищенности информационных систем, наряду с другими механизмами информационной безопасности [1]. Требования о необходимости проведения данного вида тестирования информационных систем зафиксированы в законодательстве Российской Федерации и внутренних регламентах компаний. Автоматизация в данной области позволяет значительно повысить эффективность и качество работ, сосредоточить внимание специалиста на наиболее важных вещах, а также значительно увеличить исследуемую поверхность атаки, что напрямую влияет на количество выявленных проблем безопасности. Несмотря на богатый инструментарий, созданный исследователями к данному моменту, классическая автоматизация по-прежнему имеет сложности ввиду того, что существуют целые классы уязвимостей и подходов к тестированию на проникновение, которые требуют от специалиста понимания контекста тестирования, выдвижения обоснованных предположений о принципах работы системы, а также нестандартного мышления.

Последние разработки в области искусственного интеллекта (ИИ) значительно повлияли на всю современную информационную безопасность, в том числе на автоматизацию тестирования на проникновение: исследователи активно рассматривают возможности использования данных методов в задачах, направленных на улучшение эффективности тестирования на проникновение.

В [2] предложен способ автоматизации тестирования на проникновение в сети с защитником, на основе частично наблюдаемых марковских процессов принятия решений и байесовского обучения с подкреплением. Задача тестирования на проникновение представляется как частично наблюдаемый процесс, где оба участника – атакующий и защитник – формируют план своих действий на основе наблюдений в сети. Результаты работы показывают высокую способность атакующего адаптироваться к условиям, создаваемым защитником в серии экспериментов, и показывают возможности применения используемых моделей в стандартных сценариях проведения тестирования на проникновение, где присутствует множество неопределенностей, таких как видимость сети для атакующего и возможные действия со стороны защитника.

В [3] рассматривается полноценное решение для проведения анализа защищенности веб-приложения, использующее технологии нейролингвистического программирования и обучения с подкреплением. Обобщенная структура предложенной системы тестирования на проникновение представлена на рис. 1.

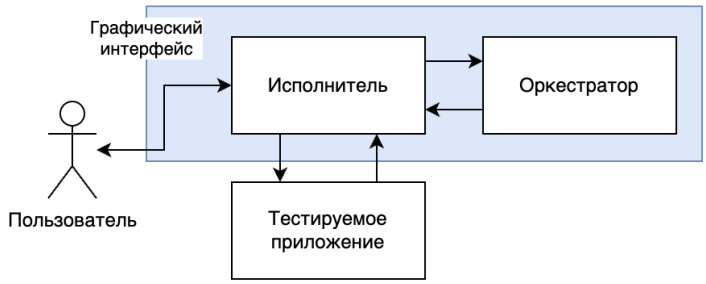


Рис. 1. Структура системы тестирования на проникновение, представленной в [2]

Центром принятия решений является компонент «Оркестратор», анализирующий контекст веб-приложения и формирующий команды и цели компоненту «Исполнитель». Последний, в свою очередь, является связующим звеном между пользователем, оркестратором и тестируемым приложением. Предложенное решение показывает достаточно высокую эффективность в обнаружении стандартных классов уязвимостей, при этом имеет

ограничение в возможностях обнаружения уязвимостей, требующих более глубокого понимания принципов работы веб-приложения. Исполнитель и оркестратор функционируют на основе используемого инструментария и методов обучения с подкреплением.

Схожие методы были использованы для исследования границ детектирования уязвимостей межсайтового скриптинга (XSS) и SQL-инъекций в [4] и [5] соответственно.

В [6] также представлен подход к автоматизации тестирования на проникновение с применением методов обучения с подкреплением. В данном случае задача тестирования на проникновения представлена как соревнование-игра «захват флага» (Capture the Flag, CTF). Задачей атакующего является нахождение уязвимого порта на сервере с получением флага. Предложенный подход успешно справляется с простыми сценариями, устанавливающими статичные порты у уязвимых серверов. Более сложные сценарии с учетом изменения конфигураций оборудования требуют оптимизации. Данное исследование подчеркивает сложность адаптации алгоритмов к сценариям недостаточной осведомленности и стохастичности. Один из вариантов дальнейших улучшений подхода заключается в применении нейронных сетей.

В [7] авторы рассматривают возможности использования большой языковой модели ChatGPT-4 в задачах тестирования на проникновение. Исследуется подход исполнения прямых команд на сервере, который размещен в сети совместно с целевым уязвимым сервером, при помощи промптов, транслируемых через LlamaIndex. Представленная схема позволила авторам выполнять конкретные действия в целевой сети, используя только описания желаемых действий. Подобный подход позволяет сделать тестирование более доступным и быстродействующим, так как дает возможность выполнять необходимые действия, не углубляясь в детали и тонкости используемых при этом инструментов.

Схожий подход представлен в [8], где более детально рассмотрен процесс генерации команд из текстовых описаний. Авторами используется модель ShellGPT для преобразования текстовых описаний в конкретные команды операционной системы. При наличии всего необходимого инструментария подобный подход обладает большим потенциалом и был улучшен в последующих работах. Результаты показывают высокую точность в преобразовании описаний в команды операционной системы.

Иной подход к автоматизации рассматривается в [9] и [10], предлагающих использовать автономные мультиагентные системы интеллектуального тестирования на проникновение MAPTA и ARTEMIS соответственно. Обе системы обладают сложной архитектурой, позволяющей интегрировать различные большие языковые модели (Large Language Models, LLM) в зависимости от контекста их использования. Пример архитектуры инструмента ARTEMIS представлен на рис. 2.

Аналогично архитектуре, изображенной на рис. 1, в данном решении используется центр принятия решений («Руководитель»), анализирующий текущее состояние и контекст, а также передающий указания другим компонентам системы. Другие же компоненты системы заметно усилены.

Модуль руководителя взаимодействует с модулем отчетности, ответственным за оформление результатов обнаруженных уязвимостей, а также с модулем управления агентами, обрабатывающим команды руководителя и динамически создающим интеллектуальные агенты для конкретной задачи при необходимости. Система MAPTA использует схожую с ARTEMIS архитектуру. Их главное различие – область применения. Если MAPTA – решение, больше нацеленное на анализ веб-приложений, то ARTEMIS – система, специализированная под внутреннее тестирование на проникновение с глубоким уровнем анализа и составления задач.

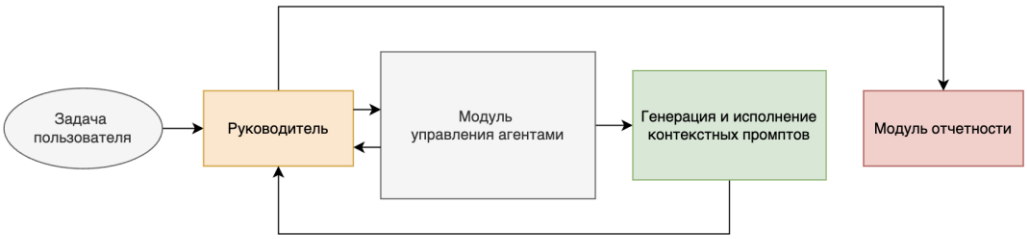


Рис. 2. Архитектура решения ARTEMIS, представленного в [9]

Данные решения являются более эффективными, чем ранее рассмотренные. Более того, в представленном авторами эксперименте ARTEMIS смог занять второе место в открытом соревновании среди 10 участников, включавших специалистов-людей в области тестирования на проникновение. Главными ограничениями подобных систем по-прежнему являются используемый инструментарий с присущими ему сложностями в обнаружении некоторых классов уязвимостей, а также поиск уязвимостей с использованием графического интерфейса.

Таким образом, наблюдается взаимозависимость между уровнем развития технологий ИИ и используемыми интеллектуальными методами автоматизации тестирования на проникновение. Сравнительная таблица данных тенденций представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Тенденции использования интеллектуальных методов для автоматизации тестирования на проникновение

Период	Преобладающие методы	Решаемая задача	Ограничения
2020-2023	Обучение с подкреплением	Автоматизация пентеста в условиях неопределенности	Отдаленность от реальных условий, проблемы обнаружения нестандартных уязвимостей
2023-2024	Большие языковые модели	Возможности применения LLM к задачам пентеста	Узкая область применения, проблемы обнаружения нестандартных уязвимостей
2025	Автономные мультиагентные системы	Приближение к эффективности специалиста	Ограниченность инструментария, проблемы детектирования отдельных классов уязвимостей

Ранние исследования были сфокусированы на решении проблемы автоматизации тестирования на проникновения как таковой, приравнивая данный вид работ к системе с большим количеством неопределенностей и используя для этого наиболее подходящие методы обучения с подкреплением. Более поздние работы были обусловлены скачком в развитии LLM и сосредоточены преимущественно на анализе их возможностей в данной области. Последние исследования ставят перед собой цель повышения эффективности имеющихся методов для приближения эффективности решения к человеку-специалисту по тестированию на проникновение.

Таким образом, перспективным направлением будущих исследований будет являться оптимизация автономных мультиагентных систем, направленная на улучшение архитектуры, использование специализированных LLM под конкретные задачи, а также решение проблем обнаружения уязвимостей, требующих понимания контекста и взаимодействия с графическим интерфейсом.

Исследование выполнено за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 25-РБ-01-13.

Список используемых источников

1. Законодательно-правовое и организационно-техническое обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем и информационно-вычислительных сетей. Котенко И.В., Котухов М.М., Марков А.С. и др. Под редакцией И.В.Котенко / Санкт-Петербург, 2000. 190 с.
2. Schwartz J., Kurniawati H., El-Mahassni E. Pomdp+ information-decay: Incorporating defender's behaviour in autonomous penetration testing // Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2020. Т. 30. С. 235-243.
3. Auricchio N. et al. An automated approach to web offensive security //Computer Communications. 2022. Т. 195. С. 248-261.
4. Caturano F., Perrone G., Romano S. P. Discovering reflected cross-site scripting vulnerabilities using a multiobjective reinforcement learning environment //Computers & Security. 2021. Т. 103. С. 102204.
5. Erdődi L., Sommervoll Å. Å., Zennaro F. M. Simulating SQL injection vulnerability exploitation using Q-learning reinforcement learning agents //Journal of Information Security and Applications. 2021. Т. 61. С. 102903.
6. Zennaro F. M., Erdődi L. Modelling penetration testing with reinforcement learning using capture-the-flag challenges: Trade-offs between model-free learning and a priori knowledge // IET Information Security. 2023. Т. 17. №. 3. С. 441-457.
7. Wang P., D'Cruze H. AI-Assisted Pentesting Using ChatGPT-4 //International Conference on Information Technology-New Generations. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. С. 63-71.
8. Diaz-Parra R. Generative AI for web application pentesting // Issues in Information Systems. 2025. Т. 26. №. 1. С. 502-514.
9. David I., Gervais A. Multi-Agent Penetration Testing AI for the Web // arXiv preprint arXiv:2508.20816. 2025.
10. Lin J. W. et al. Comparing AI Agents to Cybersecurity Professionals in Real-World Penetration Testing // arXiv preprint arXiv:2512.09882. 2025.

APPROACHES TO PENETRATION TESTING AUTOMATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Kosmachev A., Kotenko I.
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

Penetration testing is a pressing issue in ensuring the security of information systems. Automation improves testing efficiency and increases the number of vulnerabilities detected. Recent advances in artificial intelligence have significantly increased the effectiveness of penetration testing. This paper presents key research areas in the automation of penetration testing using artificial intelligence, examines research trends based on the maturity of AI technologies, and describes current limitations and future research directions.

Key words: automation, penetration testing, artificial intelligence, information security

УДК 004.056:004.8
ГРНТИ 50.37.23

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТЕЙ ПРОТОКОЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ AGENT-TO-AGENT (A2A)

И. В. Котенко[1], Х. Х. Фам[2]

[1]Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук
[2]Университет ИТМО, Факультет безопасности информационных технологий

Протокол Agent-to-Agent (A2A) задает унифицированную архитектуру для коммуникации и координации AI-агентов, являясь ключевым элементом построения современных многоагентных систем. Стандартизация автономного взаимодействия AI-агентов посредством протокола A2A позволяет повысить масштабируемость систем, однако создает новые векторы атак на уровне логики и инфраструктуры. В релевантных работах по исследованию протокола A2A были выявлены критические архитектурные уязвимости, связанные с утечкой конфиденциальных данных, захватом управления агентом и дестабилизацией системы. В работе проводится оценка уязвимостей протокола A2A, рассматриваются конкретные векторы атак, а также предлагаются направления для минимизации рисков безопасности.

Agent-to-Agent, протокол, AI-агент, многоагентная система, уязвимость, информационная безопасность

Стремительное развитие многоагентных систем (МАС), в которых автономные сущности искусственного интеллекта (AI-агенты) взаимодействуют для решения комплексных задач, обусловило острую необходимость в стандартизированных протоколах взаимодействия. Для решения этой задачи компанией Google был разработан протокол Agent-to-Agent (A2A), основная цель которого – создание унифицированной архитектуры для коммуникации и координации между AI-агентами. Спецификация протокола A2A регламентирует унифицированную коммуникационную структуру, базирующуюся на четырех ключевых сущностях: Карточка Агента (Agent Card), агрегирующая метаданные и навыки для идентификации участников в системе; Задача (Task), представляющая собой дискретную делегируемую единицу работы; Сообщение (Message), обеспечивающее оперативный обмен информацией и координацию требований в процессе выполнения; и Артефакт (Artifact), фиксирующий конечный результат выполнения задачи, например, в форме

отчета или файла данных. Для обеспечения совместимости и простоты внедрения A2A базируется на широко распространенных веб-стандартах, таких как HTTP, HTTPS и JSON-RPC. В аспекте безопасности протокол интегрирует современные механизмы аутентификации и авторизации, используя OAuth 2.0 и криптографически подписанные JSON Web Tokens (JWTs) для обеспечения целостности и подлинности сообщений [1]. Схема потока сообщений в протоколе A2A, иллюстрирующая делегирование задач между клиентским агентом и удаленным агентом через обработчик протокола, представлена на рис. 1.

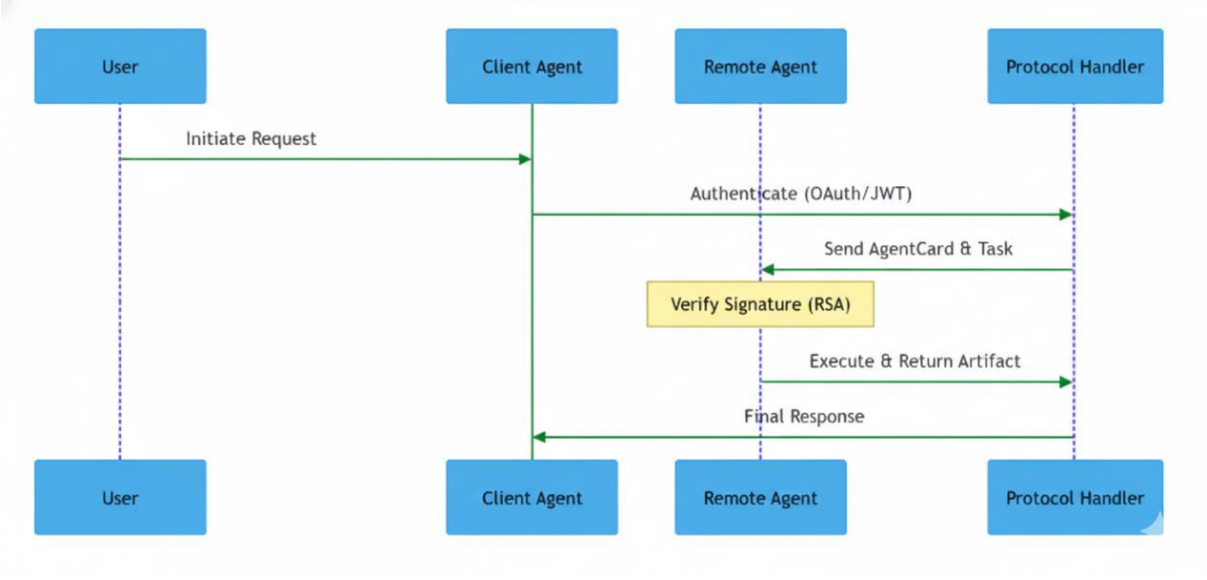


Рис. 1. Схема потока сообщений в протоколе A2A, представленного в [1]

В многоагентных системах (МАС) отдельные автономные агенты обладают способностью принимать решения, обмениваться данными и выполнять действия без прямого вмешательства человека. Отсутствие надежных механизмов безопасности в МАС может привести к серьезным последствиям, таким как утечка конфиденциальных данных, захват управления агентом и дестабилизация системы [2].

В [3] предложена модель AI-SAFE, определяющая структурированный фреймворк для моделирования угроз и обеспечения безопасности AI-агентов и мультиагентных систем. Показано, что наиболее критические недостатки безопасности A2A проистекают не из ошибок проектирования, а из аспектов, которые не были четко регламентированы или остались открытыми в технической спецификации. Эти «серые зоны», преимущественно находящиеся на Уровне 3 (Инфраструктура и Оркестровка) модели AI-SAFE, создают пространство для произвольной интерпретации и небезопасного внедрения со стороны разработчиков, что непреднамеренно открывает

потенциальные поверхности атаки. Фундаментальным недостатком является нерегламентированное обнаружение агентов (Unregulated Agent Discovery). Спецификация A2A не требует обязательного и безопасного механизма для обнаружения и верификации агентов. Вместо этого она предлагает общие методы, такие как прямое указание URL другого агента в конфигурационном файле. Такой подход создает вектор атак «Человек посередине» (MitM), при которых злоумышленник может развернуть поддельный сервер для перехвата, прослушивания или модификации всего коммуникационного трафика между агентами. Ситуация усугубляется отсутствием иерархической структуры взаимодействия агентов (Lack of Hierarchy). Протокол A2A рассматривает всех агентов в виде равноправных сущностей, не имея встроенного механизма ролевых моделей или иерархических структур. В крупномасштабных многоагентных системах отсутствие четкой такой структуры усложняет управление полномочиями, установление приоритетов и контроль потока коммуникации. Это может привести к тому, что низкопривилегированные агенты могут неконтролируемо отправлять запросы высокопривилегированным агентам [4].

Эти архитектурные пробелы формируют векторы атак «Человек посередине» (MitM) и Спуфинга (Spoofing). Типичный механизм атаки – манипулирование значением a2aEndpointUrl в поддельной Карточке Агента или в конфигурационном файле агента. Злоумышленник может изменить этот URL, чтобы он указывал на контролируемый им сервер «Человек посередине» (MitM). Когда агент-жертва пытается связаться с легитимным сервисом, он фактически отправляет все данные на сервер злоумышленника [5, 6]. Потенциальные последствия этой атаки включают прослушивание, перехват, модификацию данных и помимо олицетворения, уязвимости в управлении сессиями, также позволяют злоумышленникам эксплуатировать уже аутентифицированные рабочие сессии.

Для защиты многоагентной системы первым и наиболее важным шагом является построение надежной основы для аутентификации, обнаружения и коммуникации между агентами. Это устраняет основные риски, такие как олицетворение и атаки «Человек посередине». Для внедрения Надежного Реестра Агентов (Trusted Agent Registry) необходим механизм централизованной регистрации, функционирующий как удостоверяющий центр (Certificate Authority) для агентов. В этом реестре каждый агент должен быть верифицирован и ему должен быть выдан цифровой сертификат (аналогично SSL/TLS для веб-сайтов). При коммуникации агенты должны предъявлять и верифицировать сертификаты друг друга. Это гарантирует, что они взаимодействуют с правильно аутентифицированной сущностью, эффек-

тивно предотвращая атаки олицетворения. Дополнительно требуется обязательный контроль целостности данных (Integrity Control). Для противодействия модификации данных в процессе передачи ключевые компоненты протокола, такие как Карточка Агента и описание инструмента, должны быть защищены цифровыми подписями или хэш-суммами. Перед использованием любой информации принимающий агент должен верифицировать подпись или пересчитать хэш, чтобы гарантировать, что данные не были изменены, тем самым предотвращая атаки инъекции промпта на транспортном уровне.

Уязвимости в механизмах управления токенами A2A, относящиеся к Уровню 2 (Исполнение и Инструменты) модели AI-SAFE, также создают серьезные риски, связанные с повышением привилегий и злоупотреблением сессиями. Несмотря на то, что протокол основан на стандарте OAuth 2.0, в нем отсутствуют строгие предписания и ограничения, необходимые для автономной среды. Критическим недостатком архитектуры является отсутствие ограничений жизненного цикла токена (Absence of Token Lifetime Limitations). Спецификация A2A не требует обязательного короткого времени жизни для токенов доступа. Как следствие, скомпрометированный токен может оставаться действительным в течение многих часов или даже дней, значительно увеличивая временное окно для его повторного использования злоумышленником. Практические инциденты, такие как CVE-2025-1198 (отозванные персональные токены доступа GitLab остаются принятыми) и CVE-2025-1801 (низкопривилегированный пользователь может получить JWT высокопривилегированного пользователя), подтвердили серьезность этой уязвимости. Ситуация осложняется отсутствием строгой клиентской аутентификации (Lack of Strong Customer Authentication). Протокол не интегрирует требования к многофакторной аутентификации (MFA) или биометрической аутентификации для транзакций с высокой стоимостью. Этот недостаток делает систему уязвимой для атак олицетворения, когда злоумышленник может выполнять действия от имени пользователя, не сталкиваясь с дополнительными аутентификационными барьерами.

Эти слабае места формируют вектор для атак повторного воспроизведения (Token Replay). Украденный токен доступа с длительным жизненным циклом становится временным «универсальным ключом». Злоумышленник может многократно повторно использовать (replay) этот токен для несанкционированного доступа к ресурсам или повторного выполнения действий (таких как финансовые транзакции) без повторной аутентификации. Чем дольше жизненный цикл токена, тем выше риск.

Для устранения недостатков в управлении авторизацией необходим переход на принудительное использование короткоживущих токенов (Short-Lived Tokens). Протокол должен требовать, чтобы чувствительные операции, такие как финансовые транзакции или верификация личности, использовали токены, действительные в течение очень короткого времени (например, от 30 секунд до 5 минут). В идеале, эти токены должны быть одноразовыми, чтобы полностью исключить риск от атак повторного воспроизведения. Помимо указанного, для действий с высоким риском протокол должен интегрировать строгую клиентскую аутентификацию (SCA) как обязательную часть потока обработки. Это означает, что система должна требовать от конечного пользователя повторной аутентификации с помощью второго фактора перед выполнением таких действий, как перевод средств или обмен идентификационными данными.

В дополнение к вышесказанному следует отметить риск раскрытия данных самим агентом (Risk of Data Disclosure by the Agent Itself). Поскольку конфиденциальные данные часто хранятся в контексте агента для обслуживания больших языковых моделей (LLM), они могут быть извлечены посредством таких атак, как инъекция промпта (prompt injection) [5, 6]. Злоумышленник может обмануть агента, заставив его раскрыть секретную информацию, которой он владеет. Атака инъекции промпта относится к классу атак Уровня 1 (Интерфейс) в модели AI-SAFE.

Для нейтрализации этих угроз предлагается внедрение архитектуры потока прямой передачи данных (Direct Data Transfer Flow). Для обработки конфиденциальной информации, такой как данные кредитных карт или идентификационные документы, архитектура системы должна быть спроектирована таким образом, чтобы данные отправлялись напрямую от пользователя конечному поставщику услуг, полностью минуя промежуточного агента. Наряду с этим, критически важным представляется минимизация прав доступа агента к данным (Data Access Minimization). Агенту должны быть предоставлены права доступа только к абсолютно минимальному объему данных, необходимому для выполнения его задачи. Строгое соблюдение этого принципа не только защищает конфиденциальность, но и значительно снижает риск от атак инъекции промпта, поскольку, если агент не имеет доступа к конфиденциальным данным, его невозможно обманом заставить их раскрыть.

Таким образом, несмотря на то что A2A является важным шагом к стандартизации коммуникации в многоагентных системах, его текущая версия все еще содержит риски безопасности. Перспективным направлением будущих исследований будет являться оптимизация архитектуры без-

опасности в спецификации протокола A2A, а также разработка дополнительных механизмов обнаружения и противодействия атакам.

Исследование выполнено за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 25-РБ-01-13.

Список используемых источников

1. Louck Y., Stulman A., Dvir A. Security Analysis of Agentic AI Communication Protocols: A Comparative Evaluation // arXiv preprint arXiv:2511.03841. 2025.

2. Котенко И. В. Ключевые области внимания на стыке многоагентных систем и кибербезопасности // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024): сб. докл. М.: ИПУ РАН, 2024. С. 2740–2745.

3. AI Secure Agentic Framework Essentials (AI-SAFE) v 1.0. Yandex Cloud, 2025. URL: cloud.yandex.ru (дата обращения: 13.02.2026).

4. Ivolake. AI-агенты и мультиагентные системы, MCP и A2A. Основные угрозы и подходы к обеспечению безопасности // Habr. 2025. URL: https://habr.com/ru/articles/920744/ (дата обращения: 13.02.2026).

5. Louck Y., Stulman A., Dvir A. Improving Google A2A Protocol: Protecting Sensitive Data and Mitigating Unintended Harms in Multi-Agent Systems // arXiv preprint arXiv:2505.12490. 2025.

6. Zehang D. et al. AI Agents Under Threat: A Survey of Key Security Challenges and Future Pathways // ACM Computing Surveys. 2025. Vol. 57. № 7. Art. 182.

ASSESSMENT OF SECURITY VULNERABILITIES IN THE AGENT-TO-AGENT PROTOCOL (A2A)

Kotenko I.[1], Pham H.[2]
[1]St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
[2]National Research University ITMO

The Agent-to-Agent (A2A) protocol defines a unified architecture for communication and coordination among AI agents and serves as a key element in the construction of modern multi-agent systems. The standardization of autonomous interactions between AI agents through the A2A protocol enhances system scalability; however, it also introduces new attack vectors at both the logical and infrastructural levels. Relevant studies on the A2A protocol have identified critical architectural vulnerabilities associated with confidential data leakage, agent takeover, and system destabilization. This paper assesses vulnerabilities in the A2A protocol, examines specific attack vectors, and proposes directions for minimizing security risks.

Key words: Agent-to-Agent, protocol, AI-agent, multi-agent system, vulnerability, information security

УДК 004.772
ГРНТИ 49.38.49

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗЛОУМЫШЛЕННИКА В СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОГО ТРАФИКА

А. В. Красов, А. С. Салита

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

На сегодняшний день, большая часть атак происходит либо при помощи внутренних сотрудников, так называемых инсайдеров, либо после закрепления злоумышленников внутри организации. К сожалению, не всегда удается заметить злоумышленника, прежде чем он очистит логи или получит доступ к системам защиты. В данной статья мы разберем возможные варианты определения устройства, с которого работает злоумышленник на основе подозрительного сетевого трафика. Рассмотрим сценарии подключения, как с корпоративного устройства, так и с личного.

сетевые протоколы, транспортные протоколы, сетевой анализ, сетевая безопасность, стеганография

Говоря о злоумышленнике в сети предприятия стоит отдавать отчет, что это может как внутренний сотрудник – инсайдер, так и взлом компьютера пользователя, а также стоит учитывать, что таких компьютеров может быть несколько.

Стоит отметить, что при атаках злоумышленник может использовать, как конечную рабочую станцию сотрудника, так и сервер или виртуальную машину в самой сети. Исходя из всего вышесказанного необходимо точно определять аномалии в сети и их природу, поскольку данные некоторые аномалии могут свидетельствовать об использовании нарушителем стеганографии [1-4]. Также необходимо определять место закрепления злоумышленника, для понимая дальнейших возможных векторов атак, а также отключения подозрительных машин из сети предприятия, вынесения их в карантинную зону и т.п.

Определимся с критериями, какой трафик может указывать на присутствие злоумышленника в сети. Изначально это могут быть аномалии, связанные с объемом или скоростью трафика. Например, аномально высокий исходящий трафик может сигнализировать о утечке данных или же участие хоста в ботнет сети. Стоит отметить, что злоумышленники понимают дан-

ный паттерн, поэтому редко выгрузка информации происходит большими объемами за короткий промежуток времени. Также стоит отметить, что большое кол-во входящего трафика, а также кол-ва пакетов могут свидетельствовать о горизонтальной разведке внутри организации. К этому паттерну стоит присмотреться подробнее, снять трафик и проанализировать его. Также существует паттерн «low and slow» – это аномально низкая активность хоста, после которой следует аномально высокая активность. Такой паттерн может указывать на то, что злоумышленник закрепился в сети и начал производить атаки.

Также стоит обратить внимание на использование нестандартных портов для известных сервисов. Часто злоумышленники, чтобы скрыть свое присутствие используют нестандартные порты для бэкдоров. Например, 4524 для SSH. Чтобы обнаружить данную аномалию необходимо иметь карту работы сервисов в организации. Также стоит отслеживать с какими IP адресами пытается связаться хост. Использование не существующих IP адресов или использование IP адресов из других стран, если у компании нет партнеров в этих странах, может косвенно свидетельствовать о наличии злоумышленника в компании. Использование большого количества «неправильных» пакетов является весомой причиной провести расследование. Злоумышленники часто пытаются замаскировать бэкдоры под стандартный трафик или провести атаки, поэтому большое кол-во malformed пакетов свидетельствует о попытке злоумышленника обойти межсетевой экран или провести атаку.

Также стоит обратить внимание на аномальное количество SMB, RPC, SSH, RDP, WinRM сессий с одного хоста. Такой паттерн свидетельствует о горизонтальном перемещении злоумышленника внутри сети или попытке получить доступ к ресурсам компании. Также стоит обращать внимание на нестандартные заголовки пакетов, наличие хешей вредоносного ПО в трафике и т.п.

Стоит отметить, что обнаружение злоумышленника по сетевому трафику и дальнейшее расследование инцидента требует не мало дорогостоящих решений, которые необходимо поддерживать и обслуживать.

Для выявления аномалий в трафике стоит воспользоваться системами сетевого мониторинга и анализа (NTA/NDR). Платные решения – PT Network Attack Discovery (NAD), Гарда NDR, Kaspersky Anti Targeted Attack (KATA) и другие. Как правило, такие решения предоставляют наборы правил, машинное обучение и искусственный интеллект для выявления анома-

лий, а также упрощенную интеграцию с другими системами по расследованию инцидентов. Стоит отметить, что существуют также бесплатные (opensource) решения, которые поддерживаются группой людей. Однако такие решения, более сложные в развертывании и поддержании. Примером такого решения может быть Security Onion (дистрибутив на базе Elastic Stack, Suricata): Бесплатный мощный комплекс [5]. Решение Zeek (ранее Bro) создает детализированные лог-файлы по всем сетевым протоколам, что идеально для расследования.

Стоит также отметить, что работающие на основе сетевого трафика IPS\IDS (система обнаружения вторжений) решения [6], способны детектировать атакующего на ранних стадиях.

Однако, если необходимо реагировать своевременно такие лог файлы должны передаваться в SIEM систему [7], где все логи агрегируются. Такие системы удобны для суммарного поиска данных, а также для автоматизации и ускорения рутинных задач аналитика службы безопасности в рамках расследования инцидентов.

Стоит также отметить, что в компании возможно наличие самописных инструментов для обнаружения аномалий в сети, в том числе и на основе искусственного интеллекта. Однако, если компания небольшая, то достаточно стандартного набора средств: IPS\IDS, NTA\NDR и стандартного антивируса.

Далее рассмотрим подробнее какие инструменты должны использоваться в организации, а также куда необходимо обращаться аналитику информационной безопасности для выявления злоумышленника в сети предприятия.

В первую очередь для успешной работы и снижение ложноположительных сработок аналитику необходимо грамотно настроить решения и понять, что является аномалией для сети конкретного предприятия.

Далее необходимо настроить правила корреляции в SIEM. Разберем подробнее несколько таких правил:

– «Массовое сканирование портов с одного хоста» – Один внутренний хост пытается подключиться к большому количеству различных IP-адресов и/или портов в короткий промежуток времени. Для этого правило необходимо объединение логов с межсетевого экрана (NGFW), системы обнаружения вторжений (IPS\IDS) за небольшой промежуток времени, например 5 минут. Также будут полезны данные из различных систем, которые могут показать множество обращений с одного IP адреса.

– «Аномальная активность в службе каталогов Active Directory (AD)» – Пользователь выполняет большое количество обращений к каталогам Active Directory. События необходимо брать из логов безопасности Windows (Event ID 4661, 4662) или специализированных средств защиты AD (например, Microsoft Defender for Identity). Стоит отметить, что некоторым решениям необходима постоянная синхронизация с каталогами AD. Хосты с такими решениями или пользователями необходимо добавить в исключения.
– «Использование протоколов управления между рабочими станциями» – Рабочая станция или сервер инициирует RDP, SMB, SSH или WinRM-сессии на другие рабочие станции или сервера. Это крайне нетипично для рядового пользователя. Стоит также внести в исключения терминальные сервера или рабочие станции администраторов, поскольку они постоянно подключаются для выполнения своих рабочих задач. Информацию можно получать из логов межсетевого экрана (NGFW) по порта 3389/TCP, 445/TCP, 5985-5986/TCP, 22/TCP (или любые другие порты, которые используются у вас в организации для соединений, а также из хостовых логов.
– «Исходящие соединения на нестандартные порты к внешним ресурсам» – Хост изнутри сети устанавливает соединения на необычные порты (не 80, 443 и т.д.) к внешним IP-адресам. Это может свидетельствовать о наличии бэкдоров в сети. Информацию о таких соединениях можно получить с переметровых межсетевых экранов (NGFW), а также с прокси серверов организации.
– «DNS-туннелирование – аномально длинные или частые запросы» – Нельзя обойти стороной DNS-туннелирование, которое злоумышленники используют для различных целей (от передачи информации, до управления сервером или конечной станцией). Хост генерирует необычно большое количество DNS-запросов к одному домену или доменам с длинными случайными именами (например, gf5kyd4mger.salita.com). Также защититься от данной атаки можно введя белый список сайтов, доступ к которым разрешен из сети организации, а также ограничив размер DNS запросов и их количество. Логи для отслеживания данной аномалии можно получать из DNS сервера и с межсетевого экрана (NGFW).
– «Аномально большой объем исходящего трафика с рабочей станции или сервера» – Стоит определить средний объем трафика выгружаемые каждым типов хостов за день. Аномально большой объем трафика свидетель-

ствует о выгрузке информации в сеть. Логи можно получать с межсетевого экрана (NGFW). Данные о размере трафика можно получать также из NetFlow/IPFIX.

Также для повышения уровня защищенности организации рекомендуется настроить автоматическое конфигурирование средств защиты с данными из Threat Intelligence (TI) [8] платформ. Например, можно сразу блокировать предоставленные IP адреса, такой подход поможет прервать уже начавшуюся атаку, а также поможет ее детектировать.

В заключении хочется отметить, что выявление злоумышленника на основе сетевого трафика сводится к поиску аномалий в сети. Для выявления можно использовать известные инструменты такие как межсетевые экраны (NGFW), системы обнаружения вторжений (IPS/IDS) и т.п., так и самописные решение на основе машинного обучения и искусственного интеллекта. Однако для получения максимальной производительности и ускорения реакции необходимо передавать все данные в SIEM систему для обработки, выстраивания логических цепочек (написания правил корреляции) и для повышения производительности труда специалистов информационной безопасности при выявлении и расследовании инцидентов.

Список используемых источников

1. Волкогонов В. Н., Гетьман Е. М., Салита А. С. Сокрытие информации в протоколах RTP, RTCP // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. сборник научных статей: в 4х томах. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург, 2021. С. 183-188.

2. Салита А. С., Красов А. В. Создание стеганографического канала при помощи полей // Вестник санкт-петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: естественные и технические науки, 2021, С. 36-40.

3. Коржик В. И., Красов А. В.. Цифровая стеганография: учебник М. КноРус, 2023. 324 с.

4. Красов А. В., Паскидов Н. В., Салита А. С. Использование методов машинного обучения при выявлении сетевой стеганографии // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки, 2022, С. 50-53

5. Белоусов А. Security onion. Безопасность из коробочки // Системный администратор. 2013. № 5 (126). С. 42-44.

6. Явтуховский Е. Ю. Анализ систем обнаружения вторжений на основе интеллектуальных технологий // Технические науки: теория и практика. материалы III Международной научной конференции. Сер. «Молодой ученый» 2016. С. 27-30.

7. Бабков И. Н. Анализ эффективности SIEM-системы в организации // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. сборник научных статей: в 4х томах. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург, 2021. С. 72-77.

8. Бурова А. В., Матвеева Ю. А. Threat intelligence platform как драйвер автоматизированной информационной безопасности // Цифровизация общества: состояние, проблемы, перспективы. материалы IX Ежегодной Всероссийской научно-практической конференции. 2022. С. 158-163.

DETECTING AN INVADER IN AN ENTERPRISE NETWORK BASED ON NETWORK TRAFFIC

Salita A., Krasov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Today, most attacks are carried out either through internal employees, so-called insiders, or after attackers have established themselves within an organization. Unfortunately, it's not always possible to spot an attacker before they clear logs or gain access to security systems. In this article, we will examine possible ways to identify the device an attacker is using based on suspicious network traffic. We will consider connection scenarios for both corporate and personal devices.

Key words: network protocols, transport protocols, network analysis, network security, steganography

УДК 004.7:004.89'12:004.738.5
ГРНТИ 10.89.57, 10.89.35, 10.89.39

ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫЕ СЕТИ КАК ИНСТРУМЕНТ СИНТЕЗА ВРЕДОНОСНОГО СЕТЕВОГО ТРАФИКА: АНАЛИЗ УГРОЗ И ПОДХОДОВ К ДЕТЕКТИРОВАНИЮ

Е. В. Куцев

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Быстрое развитие генеративно-состязательных сетей раскрывает дополнительные возможности для создания реалистичного синтетического сетевого трафика. В кибербезопасности это может быть и хорошо, и плохо одновременно. С одной стороны, это инструмент для улучшения систем защиты, с другой – серьезная угроза, позволяющая злоумышленникам создавать адаптивный и трудно обнаруживаемый вредоносный трафик. Главной целью статьи является анализ угроз и разработка контрмер для борьбы с ними. В данной статье анализируется применение генеративно-состязательных сетей как инструмента нападения и защиты: рассматриваются методы генерации трафика, усовершенствованные атаки, способные обходить традиционные системы обнаружения вторжений и решения на базе машинного обучения. В ходе теоретического анализа сделаны выводы о необходимости использования фундаментальных свойств синтетичности и неестественности данных для борьбы с новыми угрозами сетевой безопасности при использовании генеративно-состязательных сетей.

генеративно-состязательные сети, кибербезопасность, сетевой трафик, обнаружение вторжений, машинное обучение, глубокое обучение

Введение

Современные системы обнаружения и предотвращения вторжений все в большей степени используют методы машинного обучения (МО) и глубокого обучения (ГО) для классификации сетевого трафика на подлинный и вредоносный. Эти системы ежедневно доказывают свою высокую эффективность при обнаружении известных атак, выявляя при этом различные статистические аномалии в данных или трафике. Несмотря на высокую эффективность, системы на основе генеративно-состязательных сетей (ГСС) имеют также и свои недостатки. Основные уязвимости заключаются в наличие зависимости эффективности обнаружения атак от тех данных, на которых обучены сети. Система детектирования может быть обманута при условии генерации такого вредоносного трафика злоумышленником, который не выходит за рамки распределения нормального трафика [1].

ГСС состоит из 2 устройств: генератора и дискриминатора, которые играют в некую игру. Генератор обучается создавать реалистичные данные (пакеты или потоки трафика), а дискриминатор – отличать сгенерированные образцы от реальных. После окончания обучения генератор способен производить такие синтетические данные, которые статистически неотличимы от данных обучающей выборки. Тем самым, дискриминатор не может отличить их от реальных данных [2].

Как и во всех системах информационной безопасности (ИБ), все техники атак необходимо использовать для защиты. В первом случае имеет место использование ГСС для создания и проведения креативных гибких и скрытных атак. Во втором случае анализируются перспективные методы защиты, включая применение ГСС и различных типов ГО для действенного противодействия этим угрозам.

Архитектура ГСС для синтеза сетевого трафика

Не все типы ГСС эффективны для синтеза сетевого трафика. Рассмотрены наиболее популярные модификации, применяемые в данной области:

1. ГСС Вассерштейна с штрафом за градиент (WGAN-GP):

В классических ГСС имеются проблемы нестабильности обучения и генерации существенно менее разнообразных данных (коллапса мод). ГСС Вассерштейна используется для более плавного и предсказуемого градиента при обучении генератора. При этом используется метрика Вассерштейна, по которой рассчитываются расстояния между различными распределениями. ГСС Вассерштейна с штрафом за градиент дополнительно стабилизирует обучение, при этом добавляя штраф за большой градиент. На практике данная архитектура хорошо зарекомендовала себя для генерации многомерных числовых векторов, представляющих признаки сетевых потоков (продолжительность, количество пакетов, размер байт и т.д.).

2. Условный ГСС (CGAN):

Это одна из основных модификаций, где и генератор, и дискриминатор получают на вход дополнительную условную информацию. В области синтеза трафика это может быть метка класса (например, тип атаки: «DDoS», «PortScan»). Это позволяет злоумышленнику контролируемо генерировать трафик конкретного типа, адаптированный под определенную среду.

3. Последовательная ГСС (SeqGAN):

Так как трафик часто представляется как временная последовательность пакетов или событий, стандартные ГСС являются неоптимальными

в результате работы с фиксированными векторами. SeqGAN сочетает в себе идеи ГСС и обучения с подкреплением, где генератор – это агент обучения с подкреплением, производящий очередной элемент последовательности, а дискриминатор оценивает полную сгенерированную последовательность, предоставляя сигнал вознаграждения.

Сравнение основных характеристик типов архитектуры ГСС для синтеза трафика представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение типов архитектуры ГСС для синтеза трафика

Архитектура	Основной принцип	Преимущества для синтеза трафика	Недостатки
WGAN -GP	Минимизация расстояния Вассерштейна	Стабильность обучения, качественные числовые признаки	Не учитывает структуру последовательности
CGAN	Условная генерация	Контроль типа генерируемой атаки, адаптивность	Требует размеченных данных для обучения
SeqGAN	Генерация последовательностей	Подходит для синтеза временных рядов пакетов	Сложность обучения, вычислительная затратность

Для представления трафика в форме, пригодной для обработки нейросетями, используются два основных подхода: признаковый и пакетный. Признаковый подход предполагает извлечение статистических характеристик из сетевых потоков и их генерацию. Пакетный подход работает с низкоуровневыми данными – заголовками и полезной нагрузкой пакетов, что сложнее, но позволяет генерировать полностью правдоподобные кадры.

Использование ГСС злоумышленниками создает качественно новые угрозы для сетевой безопасности:

1. Обход систем обнаружения (IDS) и предотвращения (IPS) кибератак на базе МО: Основная угроза заключается в том, что атакующий может использовать ГСС для создания адверсариальных примеров, т. е. злонамеренного управления входными данными модели МО с расчетом заставить ее выдать неправильные предсказания). Генератор ориентирован на создание вредоносных образцов, которые дискриминатор классифицирует как нормальные. Данная методика позволяет создавать разнообразные атаки, которые постоянно изменяющиеся и не имеют статичной сигнатуры.

2. Синтез замаскированного трафика: ГСС могут генерировать по внешнему виду подлинный фоновый трафик. При этом в нем можно замаскировать узконаправленную вредоносную активность.

3. Имитация сложных атак: можно обучать ГСС на наборах данных, содержащих записи передовых атак. В результате обучения генератор научится воспроизводить не просто отдельные пакеты, но и цепочки действий злоумышленника, имитируя поведение человека.

4. Генерация трафика «нулевого дня»: ГСС, обученная на разнообразном подлинном и вредоносном трафике, способна генерировать новые комбинации признаков, которые не встречались ранее. Это может привести к невозможности детектирования системами, обученными на статистических исторических данных, что создает прообраз атаки нулевого дня.

5. Усиление ботнетов: Генератор может создавать уникальный трафик для каждого бота в сети, что делает сложным группировку их активности по общим шаблонам и выявление всей бот-сети.

Главная особенность трафика, созданного ГСС, в отличие от простого многобразия – его адаптивность к изменяющейся среде. Система может обучаться в реальном времени на основе обратной связи от целевой системы защиты, постоянно улучшая способность обманывать детектор.[3]

Одним из методов по противодействию новым, ранее неизвестным угрозам, является развитие методов ГО, предназначенных для обнаружения кибератак.

Заключение

Генеративно-состязательные сети – это мощный и опасный инструмент в наборе киберзлоумышленников. Используя ГСС, они могут создавать трудно обнаруживаемый вредоносный трафик, которым пытаются обмануть систему детектирования.

Злоумышленники придумывают новые способы для атак, при этом активно пользуясь возможностями МО и ГО. Поэтому, чтобы эффективно противостоять новым угрозам, системы обеспечения кибербезопасности должны постоянно развиваться, обучаться, адаптироваться. При этом, необходимо использовать новые техники и методики для обнаружения аномалий не только в трафике в целом, но и в неестественных свойствах данных, входящих в него. Для решения указанной задачи следует использовать средства, не уступающие по эффективности инструментам создания угроз.

На современном этапе развития для качественного детектирования угроз и противостояния различным атакам необходимо использовать возможности МО и ГО, при этом обеспечивая безопасность обучающих данных и алгоритмов.

Список используемых источников

1. Котенко И. В., Саенко И. Б., Лаута О. С., Васильев Н. А., Садовников В. Е. Безопасный искусственный интеллект // Вопросы кибербезопасности 2024 № 1(59), URL: https://cyberrus.info/wp-content/uploads/2024/02/vokib-2024-1-st03-s024-037.pdf (дата обращения: 10.01.2026). DOI: 10.21681/2311-2024-1-24-37.

2. Шишкин С. Р. Имитационное моделирование кибератак с использованием генеративных нейросетей // Экономика и качество систем связи, № 2/2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-kiberatak-s-ispolzovaniem-generativnyh-neyrosetey/viewer (дата обращения: 10.01.2026).

3. Семыкина Н. А., Садовникова Н. М. Особенности применения методов искусственного интеллекта при решении задачи мониторинга сетевого трафика с целью обнаружения атак [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», №4 (2023). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-metodov-iskusstvennogo-intellekta-pri-reshenii-zadachi-monitoringa-setevogo-trafika-s-tselyu-obnaruzheniya/viewer (дата обращения: 10.01.2026).

GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS AS A TOOL FOR SYNTHESIZING MALICIOUS NETWORK TRAFFIC: THREAT ANALYSIS AND DETECTION APPROACHES

Kutsev E.
Kyrgyz State Technical University named after. I. Razzakov

The rapid development of generative adversarial networks reveals new opportunities for creating realistic synthetic network traffic. In cybersecurity, this can be both beneficial and harmful simultaneously. On the one hand, it is a tool for improving defense systems; on the other hand, it poses a serious threat, allowing attackers to create adaptive and hard-to-detect malicious traffic. The main goal of this article is to analyze threats and develop countermeasures to combat them. The paper analyzes the use of generative adversarial networks as both an offensive and defensive tool: it examines traffic generation methods, advanced attacks capable of bypassing traditional intrusion detection systems and machine learning-based solutions. The theoretical analysis concludes that it is necessary to utilize the fundamental properties of the synthetic and unnatural nature of the data to counter new network security threats arising from the use of generative adversarial networks.

Keywords: generative adversarial networks, cybersecurity, network traffic, intrusion detection, machine learning, deep learning

УДК 004.75
ГРНТИ 20.53.15

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КЛЮЧАМИ И ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ В РЕШЕНИЯХ НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙНА

Д. В. Кушнир
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Широкое распространение систем, основанных на распределенных реестрах, привели к большому разнообразию решений по управлению ключами, формированию подписей и размещения их в блокчейне. Указанное разнообразие связано с позиционированием той или иной системы для решения какой-то конкретной задачи и оптимизацией соответствующих процедур в зависимости от этой задачи. Все блокчейн системы используют криптографические преобразования для построения цепочки блоков и требуют формирования цифровой подписи при внесении данных в блоки. При этом присутствует большое разнообразие как применяемых функций хеширования, так и алгоритмов подписи. Кроме того, подходы к работе с ключами и размещение подписей в добавляемых данных может значительно различаться. Понимание необходимости разных подходов и обоснованный выбор или модификация/эволюция блокчейн системы позволяет успешно решить задачу построения информационных систем, основанных на блокчейне.

блокчейн, распределенный реестр, секретные и открытые ключи, транзакции, цифровые подписи

Современные решения, в основе которых лежит распределенный реестр, создаются для обеспечения доверия к данным, которыми эти решения оперируют. Данные могут быть любого типа и объема, но всегда имеется ввиду, что эффективная работа распределенной системы достигается при несколько ограниченных объемах информации, которыми обмениваются пользователи такой системы [1].

Добавление данных, формально, с точки зрения самого блокчейна, не требует обязательной аутентификации пользователя, но в практических решениях это выполнено в том или ином виде. Во многих системах пользователи будут скрываться за так называемыми адресами, но в некоторых будут реально идентифицированы с получением сертификата открытого ключа.

Рассмотрим криптовалюты, как наиболее широко распространенные блокчейн решения. Рассматривая крупнейшие из них, блокчейны Bitcoin и Ethereum, можно обратить внимание, на заметные отличия встраивания

подписи в структуру данных и формат организации этих данных. Основной причиной отмеченных различий является отличие в позиционировании двух систем, если Bitcoin выступает в роли распределенной платежной системы, то Ethereum в роли распределенной платформы для вычислений, построения распределенных приложений. Разное позиционирование и история развития обозначенных криптовалют драматически сказывается на отношение к формированию ключей, подписи их хранению и использованию в системе.

Если говорить о системе Bitcoin, то можно обратить внимание на следующие особенности работы в нем с ключами. Хотя формирование секретного ключа во многих системах происходит относительно одинаково, так в качестве источника псевдослучайных данных используется /dev/urandom в Linux или CryptGenRandom в Windows и на их основе формируются секретные ключи для ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm) для кривой secp256k1 (в ряде криптовалют могут использоваться другие кривые, например, Ed25519 в Cardano, Solana; BLS12-381 для ключей валидаторов в Ethereum, эллиптические кривые ГОСТ Р 34.10-2012 (256/512 бит) с параметрами «ТК26» paramSetA в блокчейнах, предлагаемых в Российской Федерации)[2]. Большинство современных клиентов криптовалют используют иерархическую детерминированную генерацию ключей, используя тот или иной путь деривации. Этот механизм позволяет сформировать из одного начального значения целую иерархию ключей на основе HMAC-SHA512. Возможность формирования потенциально неограниченного количества ключевых пар, может быть, сгруппированных по назначению, позволяет повысить конфиденциальность записей в реестре, а детерминированная генерация позволит воссоздать их всех из относительно небольшой seed-фразы. Следующий особенность решений связана с представлением ключей. В большинстве современных решений предполагается, что пользователь напрямую не взаимодействует с ключами, а делает это опосредованно через некоторый программный интерфейс с вводом каких-либо паролей с клавиатуры или токенов, для разблокировки доступа к ключам. В связи с этим нет каких-либо специальных требований для представления ключа в удобной для человека форме. В этой связи заметно выделяется подход, который принят в биткойне, предполагающий, что пользователь в некоторых случаях будет напрямую выписывать или вводить как открытый, так, возможно, и секретный ключ. В итоге сформированные ключи могут быть представлены как в виде 256 битного числа, так и в формате WIF

(Wallet Import Format), обычно в сжатом виде. Представление в формате WIF использует кодирование base58, которое в теории, позволяет взаимодействовать с секретным ключом пользователю напрямую, так как уменьшает количество символов в представлении и защищает от некоторых ошибок набора [3]. В биткойне, на практике, кроме редких случаев (например, Вы отдаете кому-то средства не переводом, а передачей секретного ключа), пользователю нет необходимости заниматься экспортом и импортом секретных ключей. Для получения всех ключей достаточно знать seed-фразу.

Отдельного внимания заслуживает работа с адресами в различных блокчейн решениях. Формально, для реализации функционала криптовалют можно было бы не использовать адреса, а ограничиться открытыми ключами для обозначения того, кому предназначается перевод. В первых транзакциях биткойна так и было сделано. Однако, указание в транзакции непосредственно открытого ключа, имеет определенные недостатки. Открытый ключ довольно длинный, так как представляет собой точку на эллиптической кривой, и обозначение получателя с помощью его открытого ключа приводит к увеличению размера транзакции. Можно было бы использовать сжатый открытый ключ ведь эллиптическая кривая симметрична и операции выполняются по модулю нечетного числа, то достаточно указать «x» координату и четность координаты «y». Считается, что, возможно, Сатоши Нокамото не знал об этой особенности, что привело к решению использовать более компактную запись и вместо открытого ключа использовать его хеш (в современном биткойне открытый ключ всегда сжатый и для получения адреса хеш вычисляют тоже из сжатого открытого ключа). Кроме того, тот факт, что что получатель теперь обозначается адресом, позволяет скрыть от потенциального злоумышленника открытый ключ и защитить секретный, в том числе и от вычисления на квантовом компьютере. Открытый ключ станет известен только когда будет сформирована транзакция перевода средств на следующий адрес [2]. В тоже время в эфириуме открытый ключ используется несжатый, так как он напрямую не указывается в блокчейне (может быть восстановлен из подписи). Биткоин предполагает активную работу пользователей с адресами. Подразумевается, что можно предъявить другому участнику адрес, записав его на листе бумаге, показав в виде QR-кода, пересылая по почте или размещая на сайте. Аналогично можно получить от кого-то адрес и ввести его в программу с клавиатуры или с помощью считывателя QR-кодов. Конечно, любой из этих методов должен предполагать проверку адреса на подлинность перед тем, как отправить на него

средства. Такое разнообразное взаимодействие с адресом привело к созданию механизма защиты адреса от ошибок при считывании и вводе. Так адрес в биткойне это не просто хеш открытого ключа, а закодированный хеш: Адрес = Base58Check(0x00 + RIPEMD160(SHA256(0x02/0x03 + x)) + Checksum) [4]. Применяется кодирование base58check, для исключения ошибок при вводе некоторых похожих символов и уменьшения общей вероятности ошибки. В более новых транзакциях применяется кодирование bech32, а в последнее время его усовершенствованная версия bech32m. Похожие подходы используются и в некоторых других криптовалютах, таких как Monero, Solana, Cardano, Litecoin. Вместе с тем, в Ethereum адрес это последние 20 байт от хеша keccak открытого ключа и только в последнее время появилась возможность некоторой проверки правильности введенного адреса на основе применения строчных и прописных букв. Эфириум позиционировался как средство выполнения распределенных вычислений, а не платежей и частое взаимодействие пользователя с адресами не предполагается.

В отечественных разработках, и ряде других решений, адреса, для обозначения получателей не используются [5]. Обычно предполагается, что все пользователи должны быть идентифицированы и для получения возможности подписывать транзакции должны сформировать ключи с получением сертификата УКЭП (усиленная квалифицированная электронная подпись) от одного из аккредитованных удостоверяющих центров Российской Федерации.

Применение подписей в распределенных реестрах имеет ряд особенностей, связанных с назначением конкретной системы. В распространенных в мире биткойне и эфириуме используется одинаковый адлорит ECDSA на основе эллиптической кривой secp256k1. Важной особенностью биткойна является не простое подписание транзакции, а размещение подписи в так называемом scriptSig скрипте (или в поле witness с 2017 года) в виде: <Signature> <Public Key>. Каждая транзакция тратит ранее полученные средства. Отправка средств подразумевает выставление условий для последующей траты тоже в виде скрипта scriptPubKey. В простейшем случае от может выглядеть следующим образом: OP_DUP OP_HASH160 <Public Key Hash> OP_EQUALVERIFY OP_CHECKSIG, т.е. состоит из операндов и кодов операций. При валидации эти скрипты выполняются поочередно, начиная с scriptSig, и для подтверждения транзакции должно быть получено значение логической единицы. В Эфириуме в чистом виде в транзакции скрип-

тов нет, а весь соответствующий функционал может быть реализован в виде контрактов. Так, например, в эфириуме в рамках транзакции не создать мультиподпись или задать пороговую схему, нет возможности перевести с нескольких адресов или на несколько, однако, все это может быть реализовано в рамках смарт-контракта [6].

В современных условиях, для решений, использующих криптографию с открытым ключом, важным вопросом является устойчивость решения к потенциальным квантовым атакам. Процесс разработки и пилотного внедрения постквантовых алгоритмов сейчас активно идет. Важной особенностью является активное появление таких наработок именно в отечественных решениях. Это связано не только с большей активностью отечественных разработок, но и той особенностью, что в нашей стране не используются адреса при переводе средств, а используются сертификаты открытых ключей, т.е. он будет доступен для криптоаналитика сразу, после проведения платежа. В системах типа биткоин и эфириум открытый ключ появится только, когда средства уже будут забираться у «пользователя». Однако разработка возможности использования постквантовых алгоритмов для широко распространенных блокчейн систем тоже идет, так в эфириуме предложен стандарт, который позволит применять произвольную подпись, в том числе и квантово-устойчивую, в транзакции без утраты совместимости. Разрабатываются и конкретные решения, предполагающие переход на алгоритмы SPHINCS+ и, в дальнейшем, на алгоритмы, основанные на теории решеток. Возможно, сперва блокчейны будут гибридными, с точки зрения используемых подписей, и только впоследствии произойдет полный отказ от ECDSA.

Понимание особенностей архитектуры блокчейн решений и реализованных в них механизмов работы с ключами и цифровыми подписями позволяет определить потенциальные возможности системы, помимо напрямую декларируемых. Во многих случаях можно определить необходимость модификации/эволюции определенных систем и предвидеть периоды возникновения форков в системах, которые будут неизбежно происходить в распространенных решениях для соответствия современному уровню информационной безопасности и наличию востребованного функционала.

Список используемых источников

1. Nakamoto, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system // Decentralized Business Review. 2008. C. 21260.
2. Walker G. Learn me a bitcoin URL: https://learnmeabitcoin.com/ (дата обращения: 20.01.2025)
3. Blockchain Size (MB). The total size of the blockchain minus database indexes in megabytes. URL: https://www.blockchain.com/en/charts/blocks-size/ (дата обращения: 30.05.2024)
4. Bitcoin address Programming The Blockchain in C#. URL: https://programmingblockchain.gitbook.io/programmingblockchain/bitcoin_transfer/bitcoin_address (дата обращения: 20.01.2025).
5. Singhal B. Beginning Blockchain: A Beginner's guide to building Blockchain solutions/ B. Singhal, G. Dhameja, P.S. Panda Apress, 2018.
6. Prusty N. Building blockchain projects. Packt Publishing Ltd, 2017.

FEATURES OF KEY MANAGEMENT AND DIGITAL SIGNATURE APPLICATION IN BLOCKCHAIN-BASED SOLUTIONS

Kushnir D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The widespread adoption of systems based on distributed ledgers has led to a great diversity of solutions for key management, signature generation, and their placement within the blockchain. This diversity stems from the positioning of each system to solve specific tasks and the optimization of corresponding procedures depending on those tasks. All blockchain systems use cryptographic transformations to build the chain of blocks and require the generation of a digital signature when entering data into blocks. At the same time, there is significant diversity both in the hash functions used and in the signature algorithms. Furthermore, approaches to working with keys and the placement of signatures within the added data can vary considerably. Understanding the need for different approaches and making a reasoned choice or modifying/evolving the blockchain system enables the successful implementation of information systems based on blockchain.

Key words: blockchain, distributed ledger, private and public keys, transactions, digital signatures

УДК 004.056.5
ГРНТИ 81.93.29

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СОЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

А. П. Кюнер, А. А. Чечулин

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

В данной статье рассматриваются возможности применения технологий искусственного интеллекта по выявлению и противодействию кибератакам с применением элементов социальной инженерии. Представлены основные направления разработки средств защиты пользователей от мошеннических действий с использованием информационно-телекоммуникационных систем, а также проблемы, с которыми сталкиваются потенциальные жертвы и специалисты в области защиты информации. В статье описаны существующие недостатки в информационных системах, средствах обеспечения информационной безопасности, способствующие успеху социоинженерной атаки. Описаны перспективные направления развития систем искусственного интеллекта, позволяющие снизить риск реализации угроз информационной безопасности.

социальная инженерия, искусственный интеллект, мошенничество, машинное обучение, фишинг

Широкое внедрение технологий искусственного интеллекта (далее – ИИ) в повседневную жизнь способствует снижению издержек на обработку информации. В то же время это создает риски информационной безопасности (далее – ИБ). ИИ не позволяет полностью автоматизировать все шаги многоходовой кибератаки, в частности социоинженерной (далее – СИ-атаки), при этом способствует ускорению процесса разработки и совершенствованию определенных ее этапов. Основными направлениями применения ИИ злоумышленником являются: помощь в написании программного кода (в частности, с применением методов обфускации для обхода средств статистического анализа файлов), подделка медиафайлов (deepfake – технологии), автоматизированный сбор и обработка сведений из открытых источников, подготовка диалога будущего общения с жертвой. В качестве стандартных мер защиты предлагаются мероприятий по повышению осведомленности персонала, использовании модулей систем ИБ на базе ИИ, а для важных сообщений рекомендуется использовать ручную проверку с привлечением специалистов по защите информации (далее – ЗИ) [1]. Перспективным направлением применения ИИ для нарушения конфиденциально-

сти, целостности и доступности может послужить разработка интеллектуальных вредоносных программ [2].

В повседневной жизни частных лиц СИ ассоциируется с финансовым мошенничеством при использовании online-банкинга. Основными жертвами при этом являются лица, использующие электронные платежи. Применение технологий ИИ для противодействия хищению денежных средств с использованием технологий телекоммуникаций фокусирует внимание на отслеживании банковских транзакций, построении модели пользователя на основе «типичных» финансовых операций и блокировке аномальных действий, что направлено на предотвращение достижения конечной цели злоумышленника [3].

В целях предотвращения реализации целевой СИ-атаки внедрение систем ЗИ с применением элементов ИИ целесообразно проводить для: анализа сетевого трафика, выявления аномального поведения пользователя (в частности, подозрительная аутентификация), проведения аудита и поиска неочевидных уязвимостей в системах [4].

На рисунке 1 представлена частота использования технологий ИИ в ИБ. Основные усилия при разработке данных систем направлены на оптимизацию процессов выявления и реагирования на инциденты ИБ.



Рис. 1. Распределение продуктов с применением технологий ИИ по сценариям использования [5]

В целях определения возможностей и ограничений в применении ИИ для противодействия социоинженерным атакам были проанализированы соответствующие научные публикации с 2021 по 2025. В данной статье не приводится описание применения ИИ в распознавании мошеннических звонков по номеру телефона и сообщений, поскольку для этих действий применимы сигнатурные методы и не требуется применение ИИ. Для этих целей достаточно статистических методов в виде списка номеров и проверки наличия содержания ссылок в сообщении. Также в данной работе не

рассматривается использование ИИ для биометрической аутентификации ввиду узкой направленности этого механизма защиты.

Обзор отечественных и зарубежных публикаций, описывающих одновременно сферы ИИ и СИ, позволяет сделать выводы об исследованиях в данной области. Значительная доля работ российских авторов описывают применение больших языковых моделей в распознавании речи злоумышленника – этап СИ-атаки, который начинается установлением контакта с жертвой и заканчивается побуждением к выполнению действий. Ряд иностранных работ описывает применение ИИ для противодействия атакам на ранних стадиях, путем анализа возможных способов реализации угроз, уязвимостей пользователей, что является более трудоемким процессом и требует учесть значительное число факторов.

В таблице 1 представлен обзор подходов по использованию механизмов ИИ для защиты сотрудников и частных лиц от СИ-атак. В обзор включены принципы использования инструментов ИИ для предотвращения СИ-атак, как частного случая методов нарушения ИБ. Общие принципы применения ИИ в сфере ИБ, такие как автоматизация аудита, мониторинга, контроль сетевого трафика и поведения пользователей не рассматриваются.

ТАБЛИЦА 1. Применение технологий ИИ для защиты пользователей на различных стадиях атаки

Стадия	Предлагаемые в публикациях методы защиты
До атаки	Анализируются наиболее успешные траектории осуществления атаки на основе статического графа СИ и набора примеров данных [6] В целях предотвращения нецелевых СИ-атак может быть проведен анализ предрасположенности ряда категорий граждан к построению доверия со злоумышленником на основе демографических данных [7] ИИ может использоваться для автоматизации организационных мер защиты: проведения инструктажа, выявления опубликованных сведений [8]
Во время атаки	При получении подозрительного сообщения производится контентная проверка на основе языковых моделей [9] Внедрение элементов ИИ в корпоративные средства защиты информации позволяет повысить точность и скорость детектирования угроз, исходящих от фишинговых сайтов и сообщений [10] Использование ИИ для выявления сгенерированного контента (видеофайлов, аудиосообщений) [11]
После атаки	Применение ИИ в качестве интеллектуального помощника в расследовании атак, анализа вредоносного кода, установления сценариев воздействия [12]

В настоящее время ИИ не может полностью заменить сотрудника подразделения по ИБ, а группа специалистов различного профиля (реверс-инженер, оператор центра мониторинга и противодействия, аналитик угроз) является наиболее эффективным инструментом противодействия СИ.

Фундаментальной проблемой любого машинного обучения является защита от атак на обучаемые модели (состязательное обучение, атаки уклонения, отравление и другие) [13]. Требуемые ресурсы для функционирования моделей ставят вопрос о целесообразности применения ИИ в определенных задачах. К ресурсам можно отнести как аппаратное обеспечение, так и временные рамки [14]. Для эффективного обучения моделей необходим начальный набор данных о СИ-атаке [15].

Заключение

В данной статье представлены особенности проведения кибератак путем применения технологий ИИ, направления развития средств обеспечения ИБ для противодействия и выявления подобных перспективных инструментов нарушителей. Как отмечалось выше для наиболее чувствительной области необходимо проведение ручного анализа элементов атаки, что подчеркивает важную роль специалистов по ЗИ в противодействии передовым методам осуществления компьютерных атак, в частности с применением элементов СИ. Из этого следует, что разработанные механизмы защиты, основанные на ИИ, должны в большей мере соответствовать действиям специалиста в области ИБ.

Список использованных источников

1. How Does AI Social Engineering Work? // Check Point Software. URL: https://www.checkpoint.com/cyber-hub/threat-prevention/social-engineering-attacks/ai-social-engineering/ (дата обращения: 22.01.2026).

2. Николаев Е. Н. Проблемы информационной безопасности в аспекте развития искусственного интеллекта // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 48. С. 1428–1434.

3. Аркадьева О. Г. Использование методов машинного обучения для отслеживания социальной инженерии в банковских транзакциях // Oeconomia et Jus. 2024. № 4. С. 1–14. DOI: 10.47026/2499-9636-2024-4-1-14

4. Антюфеев А. Б. Применение и проблемы искусственного интеллекта в информационной безопасности при защите бизнеса // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 12(126). С. 26–28.

5. Применение технологий искусственного интеллекта в информационной безопасности // Anti-Malware.ru. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/using-artificial-intelligence-technologies-in-information-security (дата обращения: 22.01.2026).

6. Wang Z., Ren Y., Zhu H. [et al.]. Threat Detection for General Social Engineering Attack Using Machine Learning Techniques // arXiv preprint. URL: https://arxiv.org/pdf/2203.07933 (дата обращения: 22.01.2026).

7. Huseynov F., Kose B. O. Using machine learning algorithms to predict individuals' tendency to be victim of social engineering attacks // Information Development. 2024. Vol. 40, Iss. 2. P. 298–318. DOI: 10.1177/02666669221116336

8. Khan M. I. AI's Revolutionary Role in Cyber Defense and Social Engineering // International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts. 2024. Vol. 3, Iss. 4. DOI: 10.47709/ijmdsa.v3i4.4752

9. Донских Н. И. Использование ИИ в процессе обнаружения атак социальной инженерии // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2024. № 1-3. С. 48–52.

10. Применение искусственного интеллекта (ИИ) в ИБ: за и против // Anti-Malware.ru. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/AI-in-InfoSec-pros-and-cons (дата обращения: 23.01.2026).

11. Ramazan T. Methods and solutions to detect deepfake and avoid disinformation // Central Asian Scientific Journal. 2024. No. 5-1(24). P. 13–17.

12. Fakhouri H., Alhadidi B., Omar K. [et al.]. AI-Driven Solutions for Social Engineering Attacks: Detection, Prevention, and Response // 2024 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (ICCR). 2024. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICCR61006.2024.10533010.

13. Намиот Д. Е. Схемы атак на системы машинного обучения // International Journal of Open Information Technologies. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/shemy-atak-na-modeli-mashinnogo-obucheniya/viewer (дата обращения: 23.01.2026).

14. Салаватова Ю. А., Алексина М. В. Анализ данных и предсказание атак социальной инженерии с помощью ИИ // Вопросы кибербезопасности и профилактика мошенничества. Современные вызовы и решения. Хабаровск: ТОГУ, 2025. С. 158–163.

15. Титков Д. И., Резниченко С. А. Революция в аудите информационной безопасности: искусственный интеллект // Вестник науки. 2024. Т. 1 № 4(73). С. 431–438.

SOCIAL ENGINEERING. PROBLEMS OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AGAINST SOCIAL ENGINEERING

Kyuner A., Chechulin A.
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

This article describes the ability of using artificial intelligence to detect and counter based on social engineering cyberattacks. The article also presents the main directions of developing tools for securing users from malicious activities using information and telecommunications systems, as well as the problems faced by possible victims and information security officers. Existing shortcomings in information systems and information security tools that contribute to the success of a social engineering attack are presented in the paper. The article describes promising areas for the development of artificial intelligence systems that will reduce the risk of cybersecurity threats.

Key words: social engineering, artificial intelligence, scamming, machine learning, phishing

УДК 004.056.53
ГРНТИ 81.93.29

СПОСОБ СЕТЕВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТ КИБЕРАТАК НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

В. А. Липатников, К. В. Мелехов, Д. В. Макаренко

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В современных реалиях борьбы в информационной сфере постоянным вопросом остается защита информации, информационных систем и инфраструктуры от кибератак. Растущая их сложность и динамизм, таких как программы-вымогатели, фишинг и отказ в обслуживании, требуют новаторских решений, которые преодолевают ограничения используемых методов.

генеративно-состязательная сеть, средство сетевого контроля, защита информации, кибератака

Растущая сложность и частота кибератак представляют собой одну из основных угроз при обеспечении кибербезопасности (КБ), объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) в условиях информационного противоборства. Используемые методы защиты с трудом поддаются адаптации к постоянно меняющейся природе киберугроз, особенно тех, которые используют враждебные стратегии [1, 2].

В этих условиях современные способы раннего обнаружения вторжений средствами сетевого контроля (ССК) становятся ключевым элементом защиты информационной инфраструктуры. Их задача – не только выявлять известные виды атак, но и обнаруживать новые, ранее не встречавшиеся угрозы, включая сложные целевые воздействия.

Цель статьи – проанализировать пути разработки способов сетевого контроля с оперативным обнаружением многоэтапных атак в объектах КИИ.

Для эффективного противодействия все более сложным векторам атак предлагается совершенствовать ССК с использованием более гибких и интеллектуальных механизмов обнаружения.

Для анализа сетевого трафика и построения классификаторов для обнаружения атак начинают широко использоваться методы глубокого обучения (Deep Learning, DL) [3]. Такие модели DL, как сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN), рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network, RNN), длинная краткосрочная память (Long Short-term Memories, LSTM), использовались для анализа сетевого трафика и доказали свою способность автоматически выявлять атаки [4].

Рассматривается направление применения алгоритмов машинного обучения, которые создают новый контент на основе изученных данных. В отличие от традиционного искусственного интеллекта (ИИ), который анализирует и классифицирует информацию, генеративные модели производят принципиально новое.

Процесс структурирования и прогнозирования существующих и будущих угроз соответственно является неотъемлемой частью сетевого контроля при применении технологий многозадачного машинного обучения (Multi-Task Learning, MTL) *на* основе генеративно-состязательной сети (GAN).

Однако сами алгоритмы MTL могут становиться объектами атак, направленных на их обход или манипуляцию результатами детектирования. В качестве критериев эффективности ССК применяются классические метрики: точность, полнота и F-мера. Показатели позволяют оценить как качество детектирования, так и степень деградации модели под воздействием атак.

Обзор релевантных работ показал, что GAN стали многообещающим подходом в КБ благодаря своей способности моделировать сложные распределения данных и генерировать синтетические состязательные шаблоны, которые повышают надежность обнаружения [5]. В отличие от традиционных моделей контролируемого обучения, которые требуют обширных маркированных наборов данных, GAN могут генерировать вредоносный синтетический трафик, улучшая обобщение и позволяя моделям обнаружения вторжений адаптироваться к развивающимся киберугрозам. Хотя предыдущие исследования [6], изучали применение GAN для обнаружения аномалий, эти подходы в основном были сосредоточены на статических наборах данных и контролируемых средах, что ограничивало их применимость в реальных сценариях КБ. Аналогичным образом в [7] продемонстрировали способность GAN генерировать реалистичные синтетические дан-

ные для обнаружения вторжений, но их надежность в динамических сетевых условиях остается открытой проблемой. Одним из перспективных подходов сетевого контроля могут быть GAN [8]. Главным их отличием является функциональная способность моделировать сложные распределения данных и генерировать синтетические модели состязательности, которые повышают надежность обнаружения. В отличие от используемых моделей обучения, использующих маркировочные наборы данных, GAN самостоятельно генерируют искусственный вредоносный сетевой поток, что позволяет моделям обнаружения, используемых в ССК, адаптироваться к меняющимся киберугрозам. Применение GAN в ССК для раннего обнаружения и нейтрализации динамических угроз КБ за счет повышения адаптивности и устойчивости в сценариях реального времени.

Процесс функционирования способа ССК на основе GAN для обнаружения киберугроз представлен на рис. 1.



Рис. 1. Рабочий процесс ССК на основе GAN для обнаружения киберугроз

Процесс начинается со сбора данных и регистрируется в экспериментальной среде. Затем выполняется предварительная обработка данных, включая очистку, нормализацию и методы временной сегментации, для оптимизации качества данных перед их передачей в модель. После предварительной обработки данных система использует GAN для синтеза аномального трафика. Генерируются как известные, так и неизвестные типы атак. Они способствуют повышению средств сетевого контроля к обнаружению. В дальнейшем сетевой трафик классифицируется с помощью дискриминатора. В свою очередь он обучен отличать легитимный трафик от аномального в режиме реального времени. При оценке работоспособности модели учитываются следующие показатели: точность, показатель F1 и устойчивость к помехам. Это позволяет оценить ее эффективность в динамики. На этапе внедрения и анализа генерируются предупреждения и автоматические решения на основе полученных результатов. Данный процесс облегчает интеграцию системы в средство сетевого контроля, используемого для обеспечения информационной безопасности.

Процесс обнаружения киберугроз за счет использования средства сетевого контроля, основанного на применении GAN представлена на рис. 2.

Основными компонентами данного средства являются генератор и дискриминатор. Они предназначены для повышения точности и надежности обнаружения киберугроз и реагирования на них, но при этом они работаю в различных направлениях.

Генератор – это глубокая нейронная сеть, которая принимает на вход случайный шум и генерирует реалистичные образцы данных в виде кибератак. Она изучает закономерности, лежащие в основе данных, корректируя свои внутренние параметры в процессе обучения с помощью обратного распространения ошибки. Ее цель – создавать образцы, которые дискриминатор классифицирует как реальные. Генератор начинает работу со случайного шумового вектора, например со случайных чисел. Он использует этот шум в качестве отправной точки для создания поддельной выборки данных, например сгенерированного изображения. Внутренние слои генератора преобразуют этот шум во что-то, похожее на реальные данные.

Дискриминатор действует как бинарный классификатор и помогает различать реальные и сгенерированные данные. В процессе обучения он совершенствует свои классификационные способности, уточняя параметры для более точного выявления поддельных образцов. При работе использует сверточные слои или другие подходящие архитектуры, которые помогают извлекать признаки и повышать эффективность модели. Дискриминатор действует как бинарный классификатор и помогает различать реальные и сгенерированные данные. В процессе обучения он совершенствует свои классификационные способности, уточняя параметры для более точного выявления поддельных образцов. Процесс состязательного обучения GAN включает чередование обновления генератора и дискриминатора. Генератор стремится максимизировать вероятность того, что дискриминатор ошибочно классифицирует свои выходные данные как реальные, в то время как дискриминатор стремится минимизировать ошибку при отличии реальных выборок от поддельных.

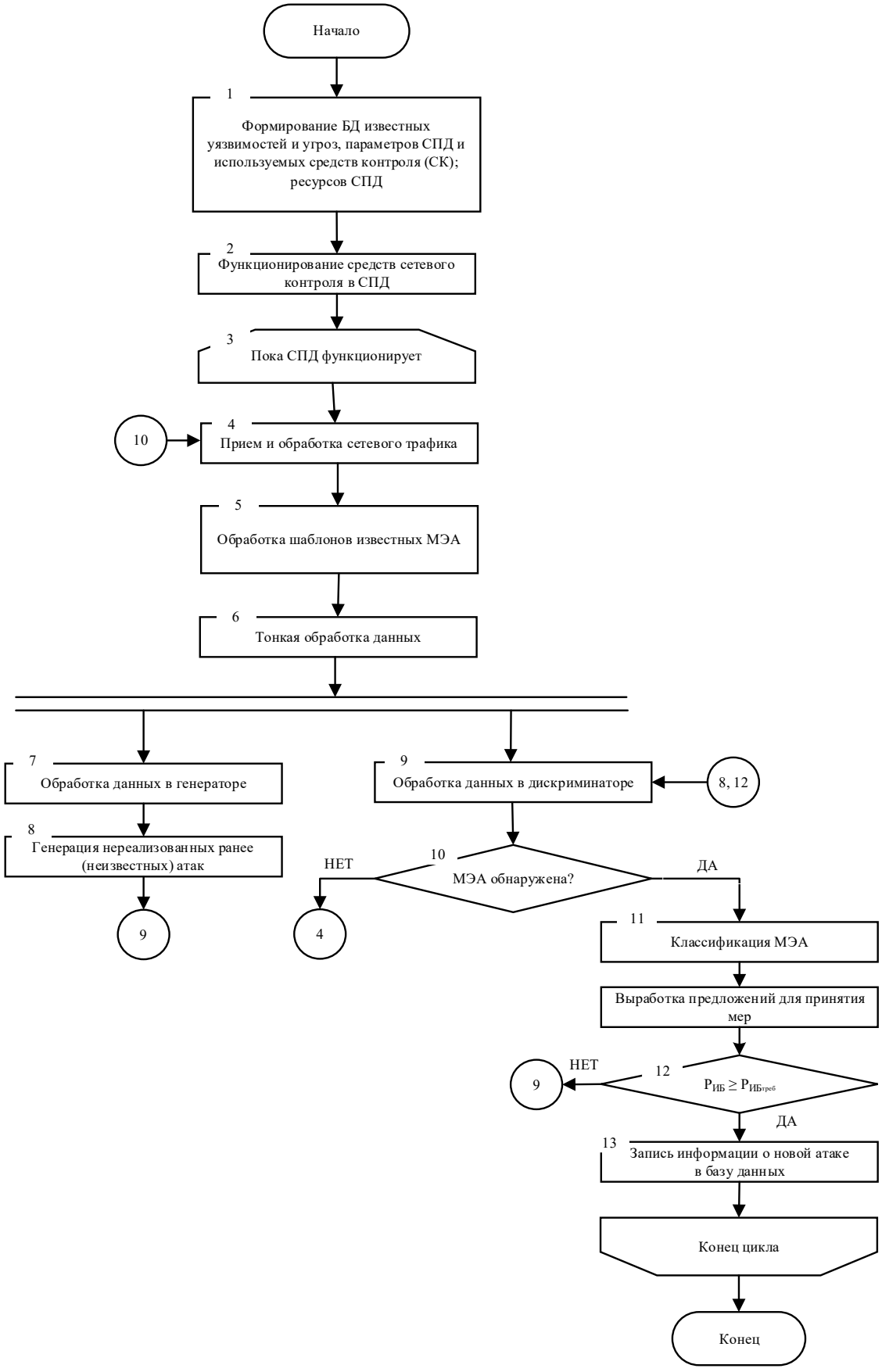


Рис. 2. Рабочий процесс ССК на основе GAN для раннего обнаружения киберугроз

Способ сетевого контроля объектов КИИ на основе многозадачного машинного обучения *и* генеративной состязательной сети повысит полноту наблюдения и оперативность обнаружение многоэтапных атак.

Список используемых источников

1. Липатников В. А., Шевченко А. А., Мелехов К. В. [и др.]. Метод активной защиты объектов критической информационной инфраструктуры от кибератак на основе прерывания процесса воздействия нарушителя // Информационно-управляющие системы. 2025. № 2 (135). С. 37–49.

2. Котенко И. В., Левшун Д. А. Методы интеллектуального анализа системных событий для обнаружения многошаговых кибератак: использование методов машинного обучения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. № 3. С. 3–16.

3. Dong H., Kotenko I. Intrusion Detection with Uncertainty based Loss Optimized Multi-Task Learning // Proceedings of the International Conference on Information Processes and Systems Development and Quality Assurance. 2023. P. 69–73.

4. Hussain F., Hussain R., Hassan S. A. [et al.]. Machine learning in IoT security: Current solutions and future challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22. Iss. 3. PP. 686–721.

5. Pachika S., Reddy A. B., Pachika B. [et al.]. Generative Adversarial Networks: Overview // Lecture Notes in Networks and Systems. 2024. Vol. 897. PP. 319–328. DOI: 10.1007/978-981-99-9704-6_29.

6. Shirazi S. A. R., Shaikh M. A Novel Approach to Android Malware Intrusion Detection Using Zero-Shot Learning GANs // Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology. 2024. Vol. 13, Iss. 2. DOI: 10.33317/ssurj.584.

7. Li Z., Wang P., Wang Z. FlowGANAnomaly: Flow-Based Anomaly Network Intrusion Detection with Adversarial Learning // Chinese Journal of Electronics. 2024. Vol. 33/ Iss. 1. PP. 58–71. DOI: 10.23919/cje.2022.00.173.

8. Villegas-Ch W., Gutierrez R., Govea J. Generative Adversarial Networks for Dynamic Cybersecurity Threat Detection and Mitigation // Emerging Science Journal. 2025. Vol. 9. No. 2. PP. 1089–1109. DOI: 10.28991/ESJ-2025-09-02-029.

A METHOD FOR NETWORK MONITORING CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE FACILITIES FROM CYBER-ATTACKS BASED ON A GENERATIVE ADVERSARY NETWORK

Lipatnikov V., Melekhov K., Makarenko D.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

Method of network control of critical information infrastructure objects against cyberattacks based on a generative-competitive network. In the current realities of the struggle in the information sphere, the protection of information, information systems, and infrastructure from cyberattacks remains a constant issue. The growing complexity and dynamism of cyberattacks, such as ransomware, phishing, and denial-of-service, require innovative solutions that overcome the limitations of existing methods.

Key words: generative adversarial network, network control tool, information protection, cyberattack

УДК 004.056.57
ГРНТИ 81.93.29

АЛГОРИТМ ПОИСКА АТАК В ЗАШИФРОВАННОМ ТРАФИКЕ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А. В. Панков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Целью данного исследования является разработка и экспериментальная оценка эффективного двухэтапного алгоритма машинного обучения для обнаружения и классификации атак в зашифрованном сетевом трафике, работающего в режиме реального времени. Алгоритм основан на последовательном применении бинарной модели (CatBoost) для отделения аномального трафика от нормального и мультиклассовой модели (Random Forest) для идентификации конкретного типа угрозы (DoS, Bot, Web-атака).

кибербезопасность, зашифрованный трафик, обнаружение атак, машинное обучение, CatBoost, Random Forest, реальное время, классификация трафика, метаданные потока

Алгоритм поиска атак в зашифрованном трафике в режиме реального времени

Изначальный датасет разделяется на обучающую и тестовую выборки [1]. При этом на обучающую выборку приходится 70% данных от изначального датасета, а на тестовую соответственно оставшиеся 30% (рис. 1). Затем к обучающей выборке, с целью увеличения количества примеров Web-атак, применяется техника под названием oversampling [2].

```
Label
BENIGN                        513144
Bot                           201710
Infiltration                  113379
DoS attacks-SlowHTTPTest       97923
DoS attacks-Hulk               97923
Web Attack  XSS                16008
Web Attack  Brute Force        16008
Brute Force -Web               16008
SQL Injection                  16008
Brute Force -XSS               16008
Web Attack  Sql Injection      16008
Name: count, dtype: int64
```

Рис. 1. Набор данных для обучения после oversampling

Двухэтапный алгоритм распознавания

Для обнаружения и классификации атак был выбран следующий двухэтапный алгоритм [3]: на первом этапе вредоносный трафик отделяется от нормального с помощью первой модели, которая была названа «бинарной», на втором этапе весь трафик, который был признан бинарной моделью вредоносным, поступает на вход второй модели, которая должна определить тип атаки, к которому принадлежит этот трафик (рис. 2). Так как вторая модель должна определять несколько классов атак, то она была названа «мультиклассовой».

```
Classification Report (Test):
              precision    recall  f1-score   support

           0       0.97      0.77      0.86    185241
           1       0.38      0.85      0.52     29943

    accuracy                           0.78    215184
   macro avg       0.67      0.81      0.69    215184
weighted avg       0.89      0.78      0.81    215184

Avg Precision Score: 0.3407493578801526
```

Рис. 2. Результаты распознавания смешанного трафика

ТАБЛИЦА 1. Результаты тестирования бинарной модели, обученной без инфильтрации

Тип трафика	Какую часть потоков бинарная модель отнесла к определенному типу трафика	
	Benign	Attack
Benign	99%	1%
Bot	1%	99%
DoS	0%	100%
Web	2%	98%

Как видно из таблицы (табл. 1) и classification report, новая бинарная модель хорошо справляется с поставленной задачей.

В качестве мультиклассовой модели использовался RandomForest [4]. При обучении использовались параметры, которые перечислены в таблице. Для мультиклассовой модели использовался та же модель данных, что и для

бинарной. Таким образом, атаки были обобщены в три класса: «DoS» и «Bot», «Web».

Приводится количество обнаруженных атак для каждого из трех типов (Bot, Web, DoS). На основании этих результатов рассчитывается процент обнаружения атаки (рис. 3). Результаты обнаружения соответствуют точности в 95 %.

Label	Как модель распознала					
	Bot	Web	DoS	Bot, %	Web, %	DoS, %
Bot	86403	45	0	99,9	0,052	0
Web	11	922	0	1,18	98,8	0
DoS	0	0	83934	0	0	100

Рис. 3. Атаки в сетевом трафике

Таким образом, были получены две модели: первая модель отделяет вредоносный трафик от нормального, а вторая определяет тип атаки, к которому относится поток.

Выводы

1. Разработана модель данных.

2. Бинарная модель, обученная на датасете, который в себя включал нормальный трафик и атаки типа Web, Bot и Infiltration, недостаточно надежно определяла атаки типа Infiltration при проверке на тестовых выборках.

3. На обучающей выборке, которая включает в себя только вредоносный трафик, была обучена мультиклассовая модель, которая предназначена для определения типа вредоносного трафика. При проверке модели на тестовых данных она показала хорошие результаты.

Список использованных источников

1. Авдошин С. М., Песоцкая Е. Ю.. Доверенный искусственный интеллект как способ цифровой защиты // Бизнес-информатика 2022 №2 С. 57-63.

2. Анализ зашифрованного сетевого трафика на основе вычисления энтропии и применения нейросетевых классификаторов / В. А. Буковшин, П. А. Чуб, Д. А. Короченцев [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 6(216). С. 117-128.

3. Беккель Л. С., Соколова И. Д., Максимова Д. Д. Анализ методов сетевой стеганографии // Вестник СПбГУТД. 2024. № 2 (1). С. 5-10.

4. Вирусы и антивирусные программы в информационной безопасности / И. О. Попов, А. С. Марунько, О. И. Петров, А. А. Олейник // Научные записки молодых исследователей. 2020. Т. 8, № 4. С. 74-80.

Статья представлена научным руководителем, и.о. заведующего кафедрой ИБКС СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом И. А. Ушаковым.

AN ALGORITHM FOR DETECTING ATTACKS IN ENCRYPTED TRAFFIC IN REAL TIME

Pankov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The goal of this study is to develop and experimentally evaluate an effective two-stage machine learning algorithm for detecting and classifying attacks in encrypted network traffic in real time. The algorithm is based on the sequential application of a binary model (CatBoost) to separate abnormal traffic from normal traffic and a multi-class model (Random Forest) to identify a specific threat type (DoS, Bot, Web attack).

Key words: cybersecurity, encrypted traffic, attack detection, machine learning, CatBoost, Random Forest, real-time, traffic classification, flow metadata

УДК 004.056.5
ГРНТИ 28.23.15

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНЫХ ЛОГОВ

А. В. Сажина, И. Б. Саенко

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассматривается задача обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем управления путем обнаружения аномальной активности пользователей, в том числе инсайдерских угроз. Представлен сравнительный анализ классических методов машинного обучения и современного гибридного подхода на основе долгой краткосрочной памяти и автоэнкодера. Для проведения корректного эксперимента разработана методология синтетической генерации репрезентативных данных на основе комплексного анализа системных логов операционной системы. Полученные результаты обосновывают перспективность внедрения интеллектуальных систем мониторинга на основе глубокого обучения для проактивной защиты критической инфраструктуры.

автоматизированные системы управления, информационная безопасность, обнаружение аномалий, машинное обучение, логи

Автоматизированные системы управления (АСУ) представляют собой комплекс технических и программных средств, предназначенных для сбора, обработки информации и автоматизации управления технологическими процессами в стратегически важных отраслях промышленности, энергетики, транспорта и обороны. Их надежное и бесперебойное функционирование является критически важным для обеспечения национальной безопасности и технологического суверенитета.

Современные АСУ характеризуются высокой степенью интеграции, распределенностью и использованием сетевых технологий, что существенно расширяет поверхность атаки. Помимо традиционных внешних угроз, особую опасность представляют инсайдерские атаки – целенаправленные вредоносные действия со стороны легитимных пользователей системы (сотрудников, администраторов) [1]. Такие пользователи обладают авторизованным доступом, глубоким знанием внутренней архитектуры и обходных путей, что позволяет им маскировать свою активность под ле-

гитимную, делая ее невидимой для классических сигнатурных систем обнаружения вторжений (Intrusion Detection System, IDS) и систем предотвращения вторжений (Intrusion Prevention System, IPS). В этой связи актуальной задачей является разработка и внедрение интеллектуальных систем мониторинга поведения пользователей (User and Entity Behavior Analytics, UEBA), способных выявлять отклонения от нормальных паттернов активности. Богатейшим источником данных для построения таких систем являются системные логи операционной системы. Эти логи представляют собой детальную хронику всех событий, происходящих в системе: входы пользователей, запуск процессов, доступ к файлам, сетевые подключения, системные вызовы и многое другое.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа эффективности различных подходов машинного обучения для задачи обнаружения аномалий в поведении пользователей АСУ на основе анализа временных последовательностей системных логов. Особое внимание уделяется сравнению классических алгоритмов и современных методов глубокого обучения, способных учитывать сложные временные зависимости [2].

Для построения модели анализа поведения были использованы синтетически сгенерированные логи, имитирующие работу АСУ на сертифицированных отечественных операционных системах, таких как Astra Linux или ОС «МСВС». Основными источниками данных выступили:

– журналы аутентификации (auth.log, secure);
– журналы системных событий (syslog);
– журналы планировщика заданий (cron);
– журналы доступа к файловой системе (audit.log).

Сырые текстовые логи были обработаны с использованием регулярных выражений и парсеров для извлечения структурированных событий. Для каждого пользовательского сеанса в системе за фиксированный временной интервал формировался вектор признаков, описывающий активность пользователя. Сформированный набор включает 18 признаков, объединенных в четыре смысловые группы:

Все числовые признаки были нормализованы с использованием StandardScaler (метод предобработки данных в библиотеке Scikit-learn, который выполняет стандартизацию признаков), что является обязательным этапом для большинства алгоритмов, основанных на вычислении расстояний или градиентном спуске. Принцип его работы заключается в том, что

для каждого признака (столбца) он вычитает среднее значение (mean) и делит на стандартное отклонение (std):

$$X_{\text{стандарт}} = \frac{X - \mu}{\sigma},$$

где X – исходное значение признака, μ – среднее арифметическое всех значений этого признака в наборе данных, σ – стандартное отклонение значений этого признака.

Результатом применения данного выражения являются:

– среднее значение признака становится равным 0;
– стандартное отклонение становится равным 1;
– данные преобразуются к стандартному нормальному распределению

Ввиду отсутствия открытых помеченных датасетов с реальными атаками на АСУ, для обучения и тестирования моделей была разработана методика синтетической генерации аномалий. Нормальные паттерны поведения были смоделированы на основе типичных рабочих процессов оператора АСУ. Аномальные сценарии, имитирующие действия инсайдера, были разделены на три категории.

Для сравнения были выбраны следующие четыре классических алгоритма машинного обучения, хорошо зарекомендовавших себя в задачах обнаружения выбросов, и одна современная архитектура глубокого обучения [9]:

1. Изолирующий лес (Isolation Forest, IF): ансамблевый алгоритм, эффективно изолирующий аномалии в случайных подпространствах признаков. Быстр и не требует предположений о распределении данных.

2. Метод опорных векторов для одного класса (One-Class SVM, OCSVM): находит гиперплоскость в пространстве высокой размерности, отделяющую основную массу данных от начала координат.

3. Фактор локального отклонения (Local Outlier Factor, LOF): оценивает локальную плотность точки данных по сравнению с плотностью ее k-ближайших соседей.

4. Эллипсоидальная аппроксимация (Elliptic Envelope, EE): предполагает, что нормальные данные имеют гауссово распределение, и подбирает эллипсоид, охватывающий их.

5. Гибридная модель LSTM-Autoencoder (LSTM-AE): архитектура глубокого обучения, специально предназначенная для анализа временных последовательностей. Сессии представлены как последовательности из 10

временных шагов, каждый шаг – вектор признаков. Энкодер: два LSTM-слоя (128 и 64 нейрона) с dropout=0,2 для предотвращения переобучения. Латентное пространство: вектор размерности 32. Декодер: симметричные LSTM-слои [3], восстанавливающие исходную последовательность. Принцип работы: модель обучается на нормальных последовательностях, чтобы минимизировать ошибку реконструкции. Аномальная сессия, паттерн которой отличается от изученного, будет восстановлена с большой ошибкой. Порог для классификации аномалии подбирается на валидационной выборке [4, 5].

Для оценки эффективности моделей использовались метрики, устойчивые к дисбалансу классов:

– $F1$- Score:

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall},$$

где

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, Recall = \frac{TP}{TP + FN};$$

– коэффициент корреляции Маттьюса (Matthew correlation coefficient, MCC) – статистическая мера качества бинарной классификации, которая учитывает все четыре ячейки матрицы ошибок:

$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}};$$

– False Positive Rate (FPR) (доля нормальных сессий, ошибочно помеченных как аномальные):

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} = \frac{FP}{N_{\text{норм}}};$$

где FP – ложноположительные случаи, TN – истинно-отрицательные случаи, $N_{\text{норм}}$ – общее количество реально нормальных объектов (равно $FP + TN$).

Результаты тестирования на изолированной тестовой выборке представлены в таблице 1 и визуализированы на рисунках 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ методов машинного обучения

Алгоритм	Точность (Accuracy)	F1-Score	MCC	FPR
LSTM-Autoencoder	0,986	0,974	0,932	0,009
Isolation Forest	0,957	0,928	0,851	0,025
One-Class SVM	0,902	0,815	0,724	0,063
Local Outlier Factor	0,876	0,761	0,683	0,085
Elliptic Envelope	0,831	0,694	0,602	0,121

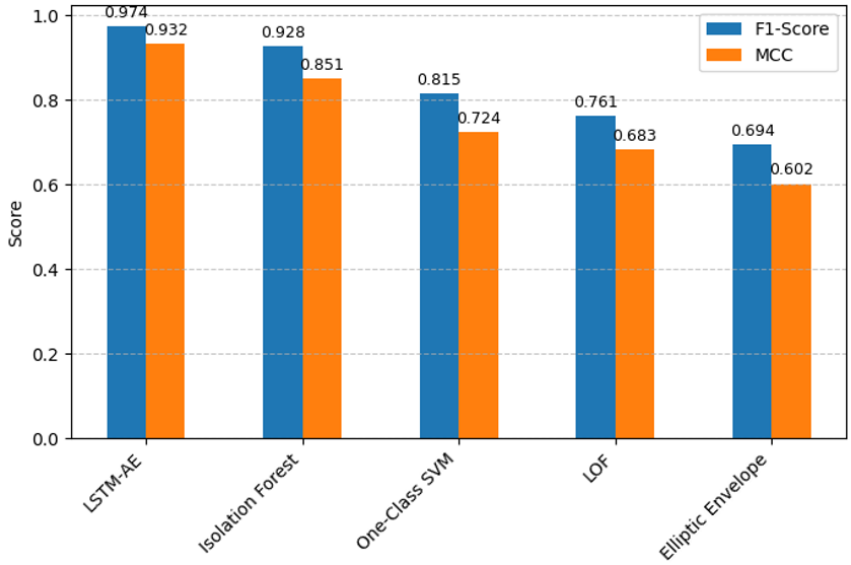


Рис. 1. Сравнение F1-Score и MCC

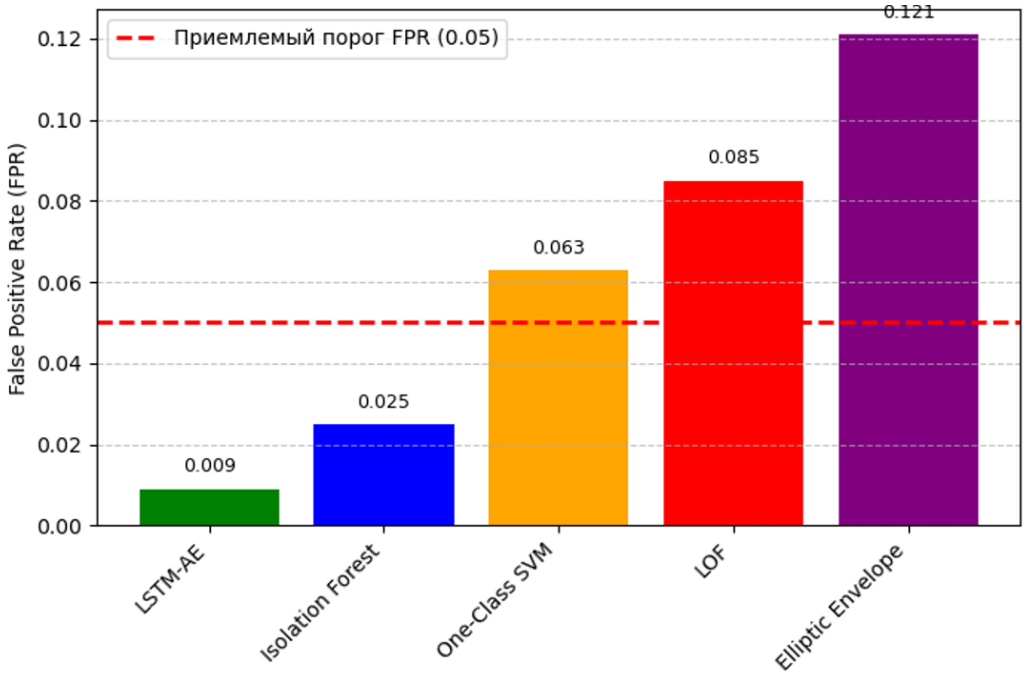


Рис. 2. Сравнение уровня ложных срабатываний

Проведем сравнительный анализ результатов.

1. LSTM-Autoencoder**.** Гибридная модель продемонстрировала наивысшие результаты по всем ключевым метрикам. Особенно впечатляющим является крайне низкий уровень ложных срабатываний (FPR=0,009), что критически важно для его применения в АСУ, где ложные тревоги ведут к усталости операторов. Высокий *F*1-Score (0,974) и MCC (0,932) подтверждают ее способность точно и сбалансированно отделять аномалии от нормы [6].

2. Isolation Forest. Классический алгоритм показал себя как надежный и эффективный инструмент, заняв второе место. Его преимущества – скорость обучения и интерпретируемость. Однако он неявно учитывает временной контекст, что, вероятно, является причиной его немного худших показателей по сравнению с LSTM-AE.

Ограничения других методов:

– One-Class SVM показал среднюю эффективность, сильно зависящую от параметров ядра;
– LOF плохо справился с глобальными аномальными, так как фокусируется на локальных отклонениях плотности;
– Elliptic Envelope оказался наименее пригодным, так как предположение о нормальном распределении данных в многомерном пространстве признаков системных логов не выполняется.

Таким образом, результаты проведенного исследования подтверждают высокий потенциал методов машинного и, в особенности, глубокого обучения для создания систем мониторинга безопасности АСУ нового поколения. Предложен и опробован комплексный подход к формированию информативных признаков из разнородных системных логов, который позволяет создать детальный цифровой профиль поведения пользователя. Экспериментально установлено, что для задачи обнаружения сложных инсайдерских аномалий, проявляющихся в виде последовательностей действий, гибридная модель LSTM-Autoencoder значительно превосходит классические методы. Ее ключевые преимущества – это учет долгосрочных временных зависимостей, низкий уровень ложных срабатываний и способность к обобщению.

Список используемых источников

1. Козленко А. В., Авраменко В. С., Саенко И. Б., Кий А. В. Метод оценки уровня защиты информации от НСД в компьютерных сетях на основе графа защищенности // Труды СПИИРАН. 2012. № 2 (21). С. 41-55.

2. Саенко И. Б., Котенко И. В., Аль-Барри М. Х. Применение искусственных нейронных сетей для выявления аномального поведения пользователей центров обработки данных // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 2(48). С. 87-97.

3. Nguyen H. D., Tran K. P., Thomassey S., Hamad M. Forecasting and Anomaly Detection approaches using LSTM and LSTM Autoencoder techniques with the applications in supply chain management // International Journal of Information Management, 2021, Vol. 57, P. 102282.

4. Sagheer A., Kotb M. Unsupervised pre-training of a deep LSTM-based stacked autoencoder for multivariate time series forecasting problems // Scientific Reports, 2019, Vol. 9. P. 19038.

5. Garcia M., Bessani A., Gashi I. et al. Analysis of operating system diversity for intrusion tolerance // Software: Practice and Experience. 2014. Vol. 44, No. 6. Pp. 735-770.

Sommer R., Paxson V. Outside the Closed World: On Using Machine Learning for Network Intrusion Detection // 2010 IEEE Symposium on Security and Privacy, 2010. PP. 305-316.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING METHODS FOR DETECTING ABNORMAL USER BEHAVIOR BASED ON SYSTEM LOGS

Sazhina A., Saenko I.
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This paper examines the challenge of ensuring information security in automated control systems by detecting abnormal user activity, including insider threats. A comparative analysis of classical machine learning methods and a modern hybrid approach based on long short-term memory and an autoencoder is presented. To conduct a robust experiment, a technique for synthetically generating representative data based on a comprehensive analysis of operating system logs was developed. The obtained results substantiate the potential of implementing intelligent monitoring systems based on deep learning for proactively protecting critical infrastructure.

Key word: automated control systems, information security, anomaly detection, machine learning, logs

УДК 004.056
ГРНТИ 81.93.29

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК ВЫЯВЛЕНИЯ КИБЕРАТАК НА ОБЛАЧНЫЕ СЕРВИСЫ

Д. В. Сахаров, Д. П. Спиридонов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

На сегодняшний день использование облачных сервисов в области информационных технологий получило широкое распространение, что повышает актуальность защиты распределенных сред. Исследование анализирует методики выявления кибератак через мониторинг событий, обнаружение аномалий и корреляцию данных. Рассматриваются особенности облачных архитектур и распределение зон ответственности между провайдером и клиентом, определяющие построение и эффективность систем обнаружения угроз. Работа систематизирует принципы построения эффективной системы обнаружения инцидентов, ориентированной на раннее выявление атак, минимизацию последствий и адаптацию к изменяющейся среде.

облачная безопасность, модели облачных сервисов, распределение ответственности, сигнатурный анализ, поведенческий анализ, киберугрозы

Современные облачные инфраструктуры остаются ключевой мишенью для кибератак, что обусловлено двумя основными факторами: высокой сложностью архитектуры облачных сред и их повсеместным распространением.



Рис. 1. Динамика поисковых запросов по облачной инфраструктуре

Анализ динамики поисковых запросов в системе Google по ключевому слову «cloud infrastructure» за период с 2020 по 2025 год демонстрирует стабильно высокий уровень интереса к данной технологии. (рис. 1) График популярности запросов не показывает значительного спада, что коррелирует с ростом количества инцидентов информационной безопасности.

В условиях облачной среды традиционные методы защиты, основанные на защите, оказываются недостаточно эффективными. Возникает необходимость в разработке и внедрении систем, способных обеспечивать раннее выявление атак, с минимизацией последствий и адаптацию к изменяющимся угрозам [1, 2].

Архитектурные модели облачных сервисов и распределение ответственности

Эффективность системы обнаружения угроз напрямую зависит от понимания архитектуры защищаемой среды. Облачные вычисления представлены не единой структурой, а набором сервисных моделей. Каждая модель предполагает определенное распределение задач по обеспечению безопасности между провайдером услуги и ее потребителем. В отрасли выделяют четыре основные модели: IaaS, PaaS, SaaS и FaaS [3].

IaaS (Infrastructure as a Service) – инфраструктура как услуга. Данная модель предоставляет потребителю базовые вычислительные ресурсы: виртуальные серверы, сетевое оборудование и системы хранения данных. Клиент самостоятельно устанавливает и настраивает операционную систему, промежуточное программное обеспечение и приложения. Таким образом, IaaS можно условно назвать моделью «самостоятельного управления», где гибкость инфраструктуры сопровождается повышенными требованиями к компетенциям клиента в области информационной безопасности.

PaaS (Platform as a Service) – платформа как услуга. В рамках этой модели провайдер предоставляет готовую среду для разработки, тестирования и запуска приложений: оборудование, операционные системы, инструменты сборки, системы управления базами данных и среды выполнения. Клиент фокусируется на написании кода и управлении данными, не затрагивая вопросы администрирования инфраструктуры. Распределение ответственности смещается: провайдер обеспечивает безопасность платформы и базового программного обеспечения, а клиент отвечает за безопасность собственного кода, конфигураций приложений и управление доступом к данным.

SaaS (Software as a Service) – программное обеспечение как услуга. Модель SaaS предоставляет пользователю доступ к готовому приложению через веб-интерфейс или интерфейс прикладного программирования. Провайдер полностью управляет инфраструктурой, операционной системой, приложением и его обновлениями. Клиент контролирует только свои данные и настройки доступа. В этой модели основная ответственность за техническую безопасность лежит на провайдере, тогда как клиент сосредотачивается на управлении учетными записями, политиками аутентификации и защите от социальной инженерии (например, фишинга).

FaaS (Function as a Service) – функции как услуга. Это бессерверная модель, при которой код выполняется только в ответ на события, а масштабирование и управление ресурсами автоматизированы. Клиент предоставляет только бизнес-логику в виде отдельных функций, не управляя серверами или средами выполнения. Провайдер отвечает за безопасность всей инфраструктуры, включая изоляцию функций и защиту триггеров. Клиент, в свою очередь, должен обеспечить безопасность кода функции, корректную настройку прав доступа и входных данных. Специфика FaaS требует особого подхода к мониторингу, так как среда выполнения является временной, а традиционные методы логирования могут быть неприменимы.

Таким образом, при переходе от IaaS к FaaS зона ответственности клиента постепенно сужается. Однако это не означает повышения безопасности: каждая модель вводит собственные векторы угроз, обусловленные спецификой управления ресурсами. Эффективная система обнаружения кибератак должна учитывать эти различия и адаптировать методы мониторинга под конкретную модель облачного сервиса и соответствующее распределение ответственности.

Специфика киберугроз в облачных средах

Распределение зон ответственности определяет векторы атак и, следовательно, требования к системам мониторинга. Анализ показывает, что для каждой модели облачных сервисов характерны специфические типы кибератак, обусловленные архитектурными особенностями [4]. Для наглядности основные векторы атак представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 Векторы кибератак для различных моделей облачных сервисов

Модель сервиса	Основные векторы атак	Объекты атак
IaaS	Брутфорс-атаки, эксплуатация уязвимостей, атаки на гипервизор	Виртуальные машины, контейнеры, сетевые конфигурации
PaaS	Инъекции кода, небезопасная десериализация, злоупотребление API	Приложения, базы данных, интерфейсы прикладного программирования
SaaS	Фишинг, компрометация учетных записей, кража сессий	Учетные записи, токены доступа, пользовательские данные
FaaS	Неправильная конфигурация прав, инъекция кода в триггеры	Функции, события, права выполнения

Методологические основы обнаружения кибератак

Изучив угрозы, необходимо перейти к инструментам защиты. В ходе исследования были выделены три ключевые методики обнаружения кибератак, применяемые в облачных средах [5, 6]. Каждая из них имеет свой принцип действия, область применения и ограничения. Обобщенная характеристика методик представлена в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2 Сравнительная характеристика методик обнаружения кибератак

Методика	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Сигнатурный анализ	Сравнение с базой известных шаблонов	Быстрое выявление известных угроз, низкие вычислительные затраты	Неэффективен против неизвестных угроз
Поведенческий анализ	Поиск отклонений от базового профиля	Обнаружение неизвестных угроз и инсайдерских атак	Чувствительность к шуму, сложность настройки
Анализ событий в реальном времени	Агрегация и корреляция логов	Выявление многоэтапных атак, полная картина инцидента	Зависимость от качества логов

Сигнатурный анализ представляет собой процедуру сравнения наблюдаемых событий с базой данных известных шаблонов атак (сигнатур). Алгоритм работает по принципу сопоставления информации с эталонными образцами, аналогично поиску отпечатков пальцев известных преступников. Эффективность методики зависит от актуальности базы сигнатур. Однако он обладает низкой способностью к обнаружению ранее неизвестных угроз,

так как не может реагировать на атаки, не имеющие зафиксированной подписи.

Поведенческий анализ базируется на статистических алгоритмах и машинном обучении. Процедура включает этап обучения системы на основе «нормального» базового профиля поведения системы и непрерывным мониторингом отклонений. Методика строит профиль нормы и ищет аномалии. Это полезно для поиска неизвестных угроз и инсайдерских атак, которые не совпадают с известными сигнатурами, но проявляются в нестандартном поведении системы (например, аномальный объем исходящего трафика или доступ в нерабочее время). Однако поведенческий анализ чувствителен к шуму и требует тщательной настройки модели, иначе будет много ложных срабатываний.

Анализ событий в реальном времени (часто реализуемый через системы класса SIEM – Security Information and Event Management) заключается в агрегации логов из разнородных источников облачной среды (виртуальные машины, контейнеры, сетевые шлюзы). Процедурная основа управления информацией и событиями безопасности включает сбор, нормализацию, хранение и анализ временных рядов событий [7]. Методика предполагает применение правил корреляции для выявления сложных многоэтапных атак, которые не видны при анализе изолированных событий. Это позволяет выявлять связи между событиями и генерировать инциденты. Критическим ограничением данного подхода является зависимость от полноты и качества собираемых логов [8].

Таким образом были изучены модели облачных сервисов, проанализированы специфические для них векторы кибератак и проведена оценка методик выявления угроз. Установлено, что распределение зон ответственности между провайдером и клиентом является фундаментальным фактором, определяющим конфигурацию систем безопасности.

Игнорирование специфики модели сервиса (IaaS, PaaS, SaaS, FaaS) приводит к неэффективному распределению ресурсов защиты. Для обеспечения уровня защиты моделей облачных сред необходимо отходить от одиночных методик в пользу комплексных решений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку алгоритмов автоматической настройки поведенческих моделей в динамических облачных средах и улучшение методов корреляции логов.

Список используемых источников

1. Исследование киберугроз в облачной среде за второе полугодие 2025 года // Habr. 2026. URL: https://habr.com/ru/companies/yandex_cloud_and_infra/news/1000542/ (дата обращения: 01.02.2026).
2. Уваров А. В., Сахаров Д. В., Ушаков И. А. Сравнительный анализ методов машинного обучения для обнаружения аномалий сетевого трафика // Технологии информационного общества. Материалы XIX Международной отраслевой научно-технической конференции. М., 2025. С. 157–160.
3. Top Cloud Security Challenges & Solutions 2025 // Seqrite. 2025. URL: https://www.seqrite.com/ru/blog/top-cloud-security-challenges-solutions-2025 (дата обращения: 10.02.2026).
4. Cloud Threat Detection // SentinelOne. URL: https://www.sentinelone.com/ cybersecurity-101/cloud-security/cloud-threat-detection/ (дата обращения: 15.02.2026).
5. Cloud Security Threats: Detection and Challenges // Palo Alto Networks. URL: https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/cloud-security-threats-detection-andchallenges (дата обращения: 20.02.2026).
6. MITRE ATT&CK® Cloud Matrix // MITRE. URL: https:// attack.mitre.org/matrices/enterprise/cloud/ (дата обращения: 20.02.2026).
7. Что такое SIEM? // Microsoft. URL: https://www.microsoft.com/ru-ru/security/business/security-101/what-is-siem (дата обращения: 20.02.2026).
8. Сахаров Д. В., Левин М. В., Фостач Е. С. [и др.]. Исследование механизмов обеспечения защищенного доступа к данным, размещенным в облачной инфраструктуре // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9, № 1. С. 40–46.

RESEARCH OF METHODOLOGIES FOR DETECTING CYBER-ATTACKS ON CLOUD SERVICES

Sakharov D., Spiridonov D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The use of cloud services in information technology has become widespread, increasing the importance of protecting distributed assets. This study analyzes methods for detecting cyberattacks through event monitoring, anomaly detection, and data remediation. It examines the specifics of cloud architecture and the distribution of responsibilities between the provider and the client, which determine the structure and effectiveness of a threat detection system. The study systematizes the principles of building an effective incident detection system focused on the early detection of attacks, mitigation of consequences, and adaptation to a changing environment.

Key words: cloud security, cloud service models, responsibility allocation, signature analysis, behavioral analysis, cyber threats

УДК 004.056.57
ГРНТИ 81.93.29

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ ПРИ ПОМОЩИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

М. А. Скорых

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Обнаружение компрометации узлов сетевой инфраструктуры играет значимую роль в обеспечение компьютерной безопасности. Одним из источников информации для поиска следов компрометации является сетевой трафик. В статье рассмотрены варианты организации каналов управления ВПО. Перечислены способы усложнения поиска каналов управления ВПО в сетевом трафике, а также их демаскирующие признаки. Представлена и описана методика обнаружения каналов управления ВПО.

обнаружение угроз, компьютерные атаки, компьютерные инциденты, вредоносное программное обеспечение, системы обнаружения вторжений, индикаторы компрометации, Threat Intelligence, Threat Hunting

При проведении компьютерных атак на информационно-телекоммуникационные сети (далее – ИТС) злоумышленники проходят ряд этапов. Одним из этих этапов является установление канала управления между центром удаленного управления злоумышленника (далее – ЦУУ) и скомпрометированными узлами ИТС атакованной организации. Для реализации канала управления используется вредоносное программное обеспечение (далее – ВПО) [1]. Поиск каналов управления ВПО в сетевом трафике является важной задачей в процессе обеспечения информационной безопасности любого предприятия [2].

На стороне скомпрометированных узлов ИТС, каналы управления ВПО организуются злоумышленниками посредством запуска агентов ВПО:

1. С использованием фреймворков постэксплуатации. Данный вариант используются как правило в случаях, когда злоумышленник закрепился в инфраструктуре и ему требуется длительный и многофункциональный доступ к узлам скомпрометированной ИТС. Наиболее популярными примерами таких решений являются «Cobalt Strike», «Merlin», «Mythic»,

«Metasploit», «Havoc», «Sliver», «Brute Ratel». Пример создания агентов представлен на рис. 1:

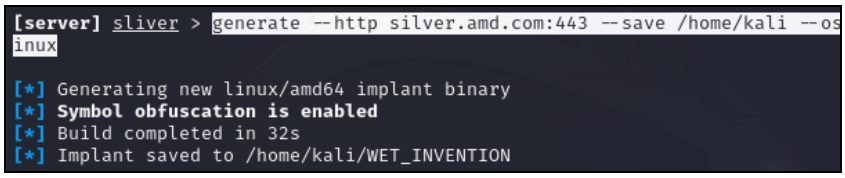


Рис. 1. Пример создания агента фреймворка постэксплуатации «Sliver»

2. С использованием самостоятельно разработанного программного обеспечения. Простейшим примером такого канала управления ВПО может служить bash-скрипт, реализующий функции выполнения команд на удаленном хосте. Данный вариант как правило используется злоумышленниками на промежуточном этапе, после того как произошла первичная эксплуатация и до того, как удается получить права привилегированных пользователей. Пример реверс-шелла представлен на рис. 2:

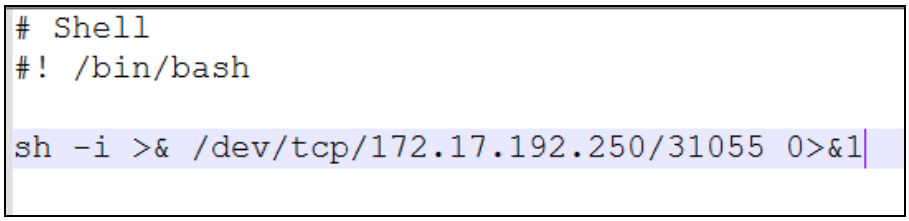


Рис. 2. Пример простейшего реверс-шелла с использованием командного интерпретатора Bash

С точки зрения сетевой инфраструктуры каналы управления ВПО могут быть построены за счет использования различных протоколов и уровней модели OSI:

1. С разработкой собственного протокола прикладного уровня. Пример сетевого трафика представлен на рис. 3:

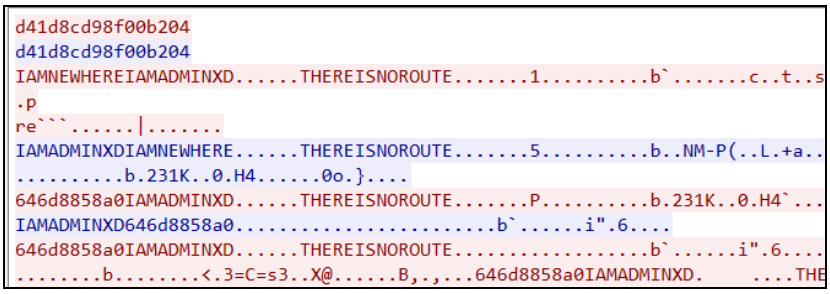


Рис. 3. Фрагмент сетевого трафика, созданного фреймворком постэксплуатации «Stowaway» с использованием собственного сетевого протокола

2. С использованием существующих общеизвестных сетевых протоколов. Пример сетевого трафика представлен на рис. 4:



Рис. 4. Фрагмент сетевого трафика, созданного фреймворком постэксплуатации «Mythic» с использованием протокола HTTP

Для поиска вредоносной активности в сетевом трафике (включая функционирование каналов управления ВПО), специалистами по компьютерной безопасности на текущий момент применяются системы обнаружения вторжений (далее – СОВ). Большинство СОВ используют сигнатурный метод обнаружения вредоносной активности. Недостатками данного метода являются невозможность обнаружения ранее неизвестных компьютерных атак, сложность выявления каналов управления ВПО в шифрованном трафике, а также трудность обнаружения этапов компьютерных инцидентов, использующих легитимные утилиты и сервисы (утилиты удаленного управления, облачные сервисы хранения информации и т.д.).

Для усложнения обнаружения каналов управления ВПО существующими средствами злоумышленники используют следующие методы:

1. Использование методов шифрования (включая безопасные протоколы, такие как SSL, SMTP/S и т.д.).
2. Изменение собственного протокола канала управления ВПО.
3. Использование легитимных утилит удаленного управления (AnyDesk, TeamViewer и т.д.).
4. Использование общеизвестных сервисов в качестве LOLC2 (Living Off the Land Command and Control) утилит. Примерами таких сервисов могут быть Telegram, Virustotal, Github и т.д. [3].
5. Использование методов стеганографии.
6. Использование методов обфускации.

С целью повышения эффективности обнаружения вредоносной активности в ИТС разработана модель функционирования каналов управления ВПО в сетевом трафике [4]. Разработанная модель позволяет с использованием статистических параметров сетевого трафика выделить 2 демаскирующих признака каналов управления ВПО:

1. «Long connection» – аномально длинные сетевые сессии, превышающие по длительности бОльшую часть сетевых сессий, сгенерированных легитимной пользовательской активностью.

2. «Beaconing» – постоянные подключения агента ВПО к своему центру удаленного управления с целью получения дальнейших указаний по принципу «keepalive».

Для реализации поиска указанных демаскирующих признаков предложена методика обнаружения каналов управления вредоносного программного обеспечения в сетевом трафике при помощи статистических параметров и использовании технологии Threat Intelligence. Методика обнаружения каналов управления ВПО основывается на сборе информации о сетевых сессиях и сетевых артефактах, работе алгоритмов вычисления статистических параметров сетевых сессий и их сравнении с заданными пороговыми значениями, проверке репутации артефактов сетевых соединений. Схема методики представлена на рис. 5.

Методика состоит из трех этапов:

1. Этап сбора и обработки входных данных.

2. Этап применения алгоритма обнаружения каналов управления ВПО.

3. Этап анализа выходных данных.

На этапе сбора и обработки входных данных происходит определение параметров набора данных с последующим вводом информации о сетевых сессиях и сетевых артефактах оператором, а также выбор статистических параметров и пороговых значений. После чего система обнаружения каналов управления ВПО загружает информацию о сетевых сессиях, нормализует записи сетевых соединений, загружает базы данных Threat Intelligence, сохраняет пороговые значения статистических параметров и выбирает алгоритмы их вычисления.

На этапе применения алгоритма обнаружения каналов управления ВПО происходит агрегирование сетевых сессий по принципу «IP-адрес источника – IP-адрес назначения», вычисление статистических параметров для определения демаскирующих признаков «Long connection» и «Beaconing», сравнение полученных результатов с пороговыми значениями, проверка репутации артефактов сетевых соединений, формирование списка сетевых сессий, с признаками работы каналов управления ВПО.

На этапе анализа выходных данных выполняется формирование отчетов по работе системы, отображение списка подозрительных сетевых соединений, а также сохранение результатов работы.

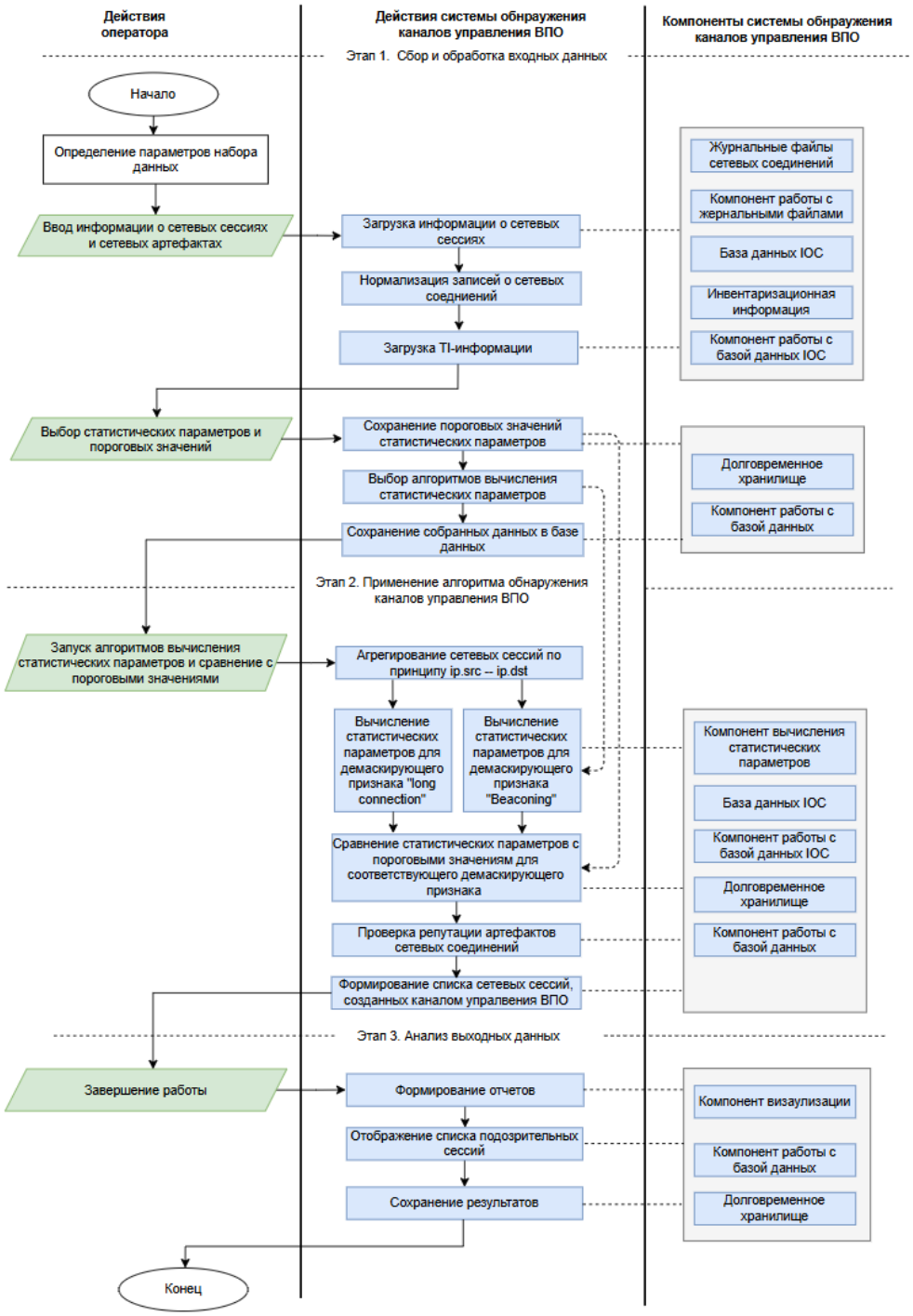


Рис. 5. Методика обнаружения каналов управления вредоносного программного обеспечения в сетевом трафике при помощи статистических параметров

Список используемых источников

1. Скорых М. А. Анализ актуальных компьютерных атак и типов вредоносного программного обеспечения в 4 квартале 2023 года / М. А. Скорых, И. Д. Таратынов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конферен-

ции в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2024. С. 629-633. EDN: LRYWTA.

2. Миняев А. А. Анализ сетевого трафика при различных видах эксфильтрации данных / А. А. Миняев, В. М. Моисеев, М. А. Скорых // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) Сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 28 февраля 01 2023 года / Под редакцией С. И. Макаренко, сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. Том 4. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2023. С. 669-676. EDN: WEBNMQ.

3. LOLC2 collection of C2 frameworks that leverage legitimate services to evade detection. URL: https://lolc2.github.io/ (дата обращения: 02.02.2026).

4. Скорых М. А. Модель функционирования каналов управления вредоносного ПО в сетевом трафике ЛВС с выходом в глобальную сеть / М. А. Скорых // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2025. № 2. С. 79-84. DOI 10.46418/2079-8199_2025_2_15. EDN: VOELTQ.

Статья представлена научным руководителем, и.о. зав. кафедрой ИБКС СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом И. А. Ушаковым.

A TECHNIQUE FOR DETECTING MALWARE COMMAND AND CONTROL CHANNELS IN NETWORK TRAFFIC USING STATISTICAL PARAMETERS

Skorykh M.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The detection of compromised network infrastructure nodes plays an important role in ensuring computer security. One of the sources of information for searching for traces of compromise is network traffic. The article discusses the options for organizing malware command and control channels. The ways of complicating the search malware command and control channels in network traffic, as well as their unmasking features, are listed. The method of detecting malware command and control channels is presented and described.

Key words: threat detection, computer attacks, computer incidents, malicious software, intrusion detection systems, indicators of compromise, Threat Intelligence, Threat Hunting

УДК 004.056
ГРНТИ 81.93.29

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ ЗРЕЛОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕНТЕСТА В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

И. В. Соколов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается проблема оценки зрелости процессов тестирования на проникновение в системе управления информационной безопасностью предприятия. Обосновывается необходимость перехода от разрозненного проведения тестов на проникновение к системному и управляемому процессу, ориентированному на повышение фактического уровня защищенности информационных активов. Анализируются подходы к понятию зрелости процессов и возможности их адаптации к задачам тестирования на проникновение. Предлагается модель оценки зрелости, основанная на совокупности количественных и качественных показателей, отражающих процессные, качественные, результативные и интеграционные аспекты.

информационная безопасность, тестирование на проникновение, зрелость процессов, система управления информационной безопасностью, оценка эффективности, управление рисками, метрики

Современные предприятия функционируют в условиях постоянного роста цифровизации бизнес-процессов, что сопровождается расширением поверхности атаки и усложнением ИТ-инфраструктуры [1]. В этих условиях традиционные методы обеспечения информационной безопасности, основанные исключительно на регламентировании и формальном соответствии стандартам, оказываются недостаточными. Существенную роль начинает играть практическая проверка устойчивости систем к реальным сценариям атак.

Тестирование на проникновение представляет собой контролируемую имитацию действий потенциального нарушителя с целью выявления уязвимостей и оценки последствий их эксплуатации. Несмотря на широкое распространение пентеста, в большинстве организаций отсутствуют формализованные подходы к оценке зрелости соответствующих процессов. Это приводит к невозможности сопоставления результатов пентеста во времени, обоснования инвестиций и интеграции полученных данных в цикл управления рисками [2].

Целью данной статьи является разработка методического подхода к оценке зрелости процессов пентеста в рамках СУИБ предприятия на основе системы метрик

Согласно международным стандартам серии ISO/IEC 27000, система управления информационной безопасностью должна обеспечивать непрерывный цикл планирования, реализации, проверки и улучшения мер защиты. Пентест в данном контексте выступает инструментом этапа «Check», позволяющим оценить фактическую эффективность реализованных мер.

В отличие от сканирования уязвимостей, тестирование на проникновение предполагает анализ цепочек атак, эксплуатацию уязвимостей и оценку бизнес-последствий инцидентов. Это позволяет использовать результаты пентеста не только для устранения технических недостатков, но и для корректировки процессов управления рисками, обучения персонала и совершенствования архитектуры безопасности.

Без формализованных показателей тестирование на проникновение, проводимое в рамках лабораторий пентеста или же в информационной инфраструктуре, часто остается разрозненной активностью и не обеспечивает прямой связи с целями системы управления информационной безопасностью [3]. В связи с этим возникает необходимость разработки количественных подходов к оценке зрелости процессов тестирования на проникновение, что позволяет системно контролировать их состояние и направленно повышать уровень защищенности организации.

Зрелость процессов традиционно определяется как степень их формализации, управляемости, воспроизводимости и способности к последовательному совершенствованию. В научной и методической практике для ее оценки широко применяются модели CMMI, COBIT Process Assessment Model, а также иные отраслевые CMM-подобные подходы, адаптируемые под специфику отдельных направлений деятельности. В контексте тестирования на проникновение зрелость целесообразно интерпретировать как способность организации системно и на регулярной основе планировать и проводить пентесты, обеспечивать сопоставимость их результатов, а также использовать полученные данные для повышения фактического уровня защищенности информационных активов. В рамках настоящего исследования предлагается пятиуровневая модель зрелости процессов пентеста, предполагающая поэтапный переход от эпизодического, неформализованного проведения работ без утвержденных методик и требований к состоянию, при котором тестирование осуществляется на регулярной основе, но еще не

подкреплено единой системой метрик, далее – к документированным и стандартизированным процессам с применением базовых показателей эффективности. Последующие уровни характеризуются интеграцией результатов пентеста в систему управления информационной безопасностью и процессы управления рисками, а наивысшая стадия предполагает непрерывное совершенствование процессов на основе накопленной аналитики, метрик и механизмов обратной связи.

Для определения уровня зрелости процессов пентеста предлагается использовать комплексный подход, включающий как измеримые (количественные), так и описательные (качественные) показатели. Эти показатели сгруппированы по ключевым аспектам. Метрики процессов показывают, насколько формализован, управляем и регулярен пентест, насколько полно он охватывает активы, есть ли утвержденные методики и насколько автоматизированы его этапы. Метрики качества оценивают глубину и точность результатов, анализируя подтвержденные уязвимости, критические сценарии атак, повторяемость проблем и полноту отчетов. Метрики результативности показывают практическую пользу пентеста для компании, измеряя скорость устранения уязвимостей, долю устраненных в срок проблем и снижение остаточного риска. Интеграционные метрики отражают, насколько хорошо пентест встроен в общую систему управления ИБ, показывая, как его результаты используются для управления рисками, корректировки защиты и интеграции в жизненный цикл разработки и эксплуатации систем (включая SDLC и DevSecOps). На рис. 1 представлена схема в общем виде.



Рис. 1. Структура метрик оценки зрелости

Для получения общей оценки предлагается использовать единый показатель зрелости процессов тестирования на проникновение. Он формируется на основе объединения нормализованных значений различных метрик, при этом значимость каждой группы показателей определяется приоритетами организации. Уровень зрелости устанавливается путем сопоставления итогового значения с заданными критериями оценки. Такой подход позволяет определить текущее состояние процессов пентеста и отслеживать изменения их зрелости во времени.

Разработанная методология была рассмотрена на примере условной организации, обладающей децентрализованной информационно-технологической инфраструктурой, что позволило продемонстрировать особенности ее практического применения. В рамках моделируемой оценки показано, что при наличии утвержденных регламентов и систематически проводимых проверок процессы тестирования на проникновение могут соответствовать третьему уровню зрелости. Вместе с тем выявляется типовая проблема, связанная с недостаточной интеграцией результатов тестирования в общую систему управления рисками. На основании проведенного теоретического анализа сформулированы рекомендации по повышению уровня зрелости, в том числе за счет автоматизации обработки результатов и внедрения ключевых показателей эффективности.

Разработка и внедрение системы метрик для оценки зрелости процессов тестирования на проникновение помогает лучше управлять этим инструментом и повысить его пользу в системе информационной безопасности компании. Наш подход позволяет измерять прогресс, находить слабые места и планировать, как улучшить процессы пентеста.

Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией модели под отраслевые особенности и использованием методов интеллектуального анализа данных для прогнозирования уровня зрелости.

Список используемых источников

1. Анализ информационной безопасности предприятия на основе сбора данных пользователей с открытых ресурсов и мониторинга информационных ресурсов с использованием машинного обучения / А. В. Красов, С. И. Штеренберг, Р. М. Фахрутдинов [и др.] // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12, № 10. С. 36-40. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10154. EDN: YMWVOX.

2. Пестов И. Е. Риски и модель угроз в распределенных вычислительных системах / И. Е. Пестов, Р. Д. Стародубов // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025). Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. Санкт-Петербург:

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 320-323. EDN: OFIYLN.

3. Андрианов В. И. Анализ существующих пентест лабораторий / В. И. Андрианов, В. В. Стасюк, С. И. Штеренберг // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020) IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция сборник научных статей, Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2020 года. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2020. С. 80-84. EDN: IAGDHK..

Статья представлена, доцентом кафедры ЗСС СПбГУТ, кандидатом технических наук И. Е. Пестовым.

A METHODOLOGICAL APPROACH TO MEASURING THE MATURITY OF PENTEST PROCESSES IN AN INFORMATION SECURITY MANAGEMENT SYSTEM

Sokolov I.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the problem of assessing the maturity of penetration testing processes in the information security management system of an enterprise. The necessity of transition from the scattered implementation of penetration tests to a systematic and controlled process aimed at increasing the actual level of security of information assets is substantiated. The approaches to the concept of process maturity and the possibility of their adaptation to the tasks of penetration testing are analyzed. A maturity assessment model is proposed based on a set of quantitative and qualitative indicators reflecting process, qualitative, productive and integration aspects.

Key words: information security, advanced training, process maturity, information security management system, performance assessment, risk management, metrics

УДК 004.056.5
ГРНТИ 81.93.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЛОЖЕНИЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА В МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

П. И. Шариков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе производится разбор структуры моделей искусственного интеллекта. Среди существующих структур рассматриваются те, которые могут быть точками для потенциального вложения цифрового водяного знака. Исследуется возможность вложения цифровых водяных знаков непосредственно в параметры или процессы генерации моделей искусственного интеллекта. Были приведены наиболее подходящие элементы структуры моделей искусственного интеллекта пригодные для вложения цифровых водяных знаков. Также были представлены преимущества и недостатки каждого рассматриваемого подхода к вложению цифровых водяных знаков в моделях искусственного интеллекта.

языковые модели, ИИ, цифровой водяной знак, digital watermark, AI

Стремительная эволюция генеративных моделей искусственного интеллекта, способных генерировать высококачественные текстовые, мультимедийные и другие данные, выводит на первый план комплекс проблем, связанных с их атрибуцией, отслеживанием распространения и защитой прав создателей [1].

Однако тот же комплекс проблем применим и к самим моделям искусственного интеллекта, которые также подвержены компрометации и необходимости в подтверждении авторства модели.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки надежных механизмов подтверждения происхождения и целостности моделей искусственного интеллекта.

Внедрение цифрового водяного знака (ЦВЗ) в архитектуру или выходные данные моделей машинного обучения представляется перспективным направлением. В отличие от традиционных цифровых водяных знаков для статических медиа файлов, вложение в модели искусственного интеллекта сопряжено с различного рода вызовами: необходимостью обеспечения устойчивости цифрового водяного знака к модификациям модели, сохране-

ния качества работы модели и обеспечения скрытого вложения [2]. В данной работе исследуется возможность вложения цифровых водяных знаков непосредственно в параметры или процессы генерации моделей искусственного интеллекта. Целью работы является анализ существующих подходов.

Для полноценного анализа точек потенциального вложения цифрового водяного знака необходимо рассмотреть модель искусственного интеллекта, как многоуровневую систему. Рассмотрим структурные компоненты моделей:

– тип архитектуры модели:
    - сверточные нейронные сети;
    - рекуррентные нейронные сети;
    - долговременная кратковременная память (LSTM) и управляемые рекуррентные блоки (GRU);
    - трансформеры;
    - генеративно-состязательные сети
    - диффузионные модели;
    - автоэнкодеры
    - гибридные архитектуры;
– параметры модели:
    - веса;
    - смещения;
    - физическое представление;
– структура слоев:
    - полносвязный;
    - сверточный;
    - слой пулинга;
    - слой внимания;
    - слой нормализации;
    - слой дропаута;
– векторные представления:
    - векторные представления слов;
    - векторные добавки;
– метаданные архитектуры:
    - размерность эмбеддингов;
    - количество голов внимания;
    - размер скрытого слоя;

- количество слоев;
- размер словаря;
- параметры свертки.

Как видно из представления выше, нейросетевые модели имеют множество элементов структуры, где каждая часть отвечает за конкретные функциональные возможности.

Для вложения цифрового водяного знака необходимо, чтобы выполнялись критерии, а именно скрытность, объем, неизменность работоспособности модели и устойчивость к атакам [3]. Остановимся на некоторых компонентах структуры подробнее с целью изучения их, как потенциальных контейнеров для вложения цифрового водяного знака.

Веса и смещения. Данные компоненты наименее устойчивая цель. Даже незначительное дообучение, квантование обрезка данных могут полностью уничтожить вложенные в веса ЦВЗ [4]. Количество слоев, размерность эмбеддингов или наименования слоев могут быть легко изменены при пересборке модели. Последовательность или тип слоев могут быть также оптимизированы без потери функциональности модели, что ставит под сомнение использование данной элемента, как контейнера для ЦВЗ. Также, скрытое вложение в модель, основанное на специфическом ответе модели на набор случайных входных данных, может быть стерто целенаправленным дополнительным обучением модели на этих же данных.

Таким образом, необходимы элементы модели, которые являются ее глубокой составной частью и глубоко используемые в процессе функционирования модели, что делает изменение данных элементов сложным и дорогостоящим.

Рассмотрим латентные пространства. Производится вложение ЦВЗ не в значения весов, а в семантические связи внутри векторных представлений или активаций промежуточных слоев. Таким образом, модель учится шифровать маркер как часть своего понимания данных. Для удаления такого ЦВЗ требуется практически полное переобучение модели на новых данных, что сопоставимо по затратам с созданием и обучением новой модели, что приводит к снижению смысла подобного рода активностей. Иными словами, в данном подходе при обучении модели используется техника, что определенная концепция всегда имеет некий скрытый атрибут [5, 6].

Функциональные backdoor-триггеры. Также, работоспособным подходом может быть обучение модели специальному запросу, на который необходимо возвращать цифровой водяной знак. Модель обучается возвращать

заранее заданный, специфический вывод при передаче ей уникального, но внешне обыкновенного входного сигнала-триггера, данный тригер будет являться ЦВЗ. У данного подхода высокая устойчивость к стандартному дообучению модели [7]. Триггер становится частью функции, которую аппроксимирует сеть. Backdoor-водяные знаки могут сохраняться даже после нескольких раундов тонкой настройки. Однако они уязвимы к целенаправленным атакам «нейросетевой чистки», которые специализированно ищут и «обезвреживают» backdoor-шаблоны внутри модели [8].

Стратегические данные обучения. Производится вложение ЦВЗ не в модель напрямую, а в процесс ее обучения через специально подготовленный набор данных. Таким образом можно использовать явные триггеры или статистические шаблоны. Например, искусственно внесенные, едва заметные корреляции в данных, которые модель усваивает как часть статистики мира. Данный подход имеет потенциально наивысшая устойчивость к атакам, направленным на разрушение ЦВЗ, так как он становится неотъемлемой частью «опыта» модели. Чтобы его удалить, злоумышленник должен не только иметь доступ к модели, но и знать точный метод генерации этих данных и провести очистку оригинального набора данных или обучить модель заново на «чистых» данных, что часто невозможно.

Таким образом, подводя итог можно определить основные возможные точки вложения цифрового водяного знака в модели искусственного интеллекта. Исходя из структуры модели, вложение ЦВЗ может производиться:

1. В архитектурные шаблоны. В структуру графа модели или специфические последовательности слоев.

2. В процесс генерации. В алгоритм выбора, следующего токена или в шаги диффузионного процесса.

3. В скрытые пространства (латентные представления). В эмбеддинги или активации промежуточных слоев.

4. В данные и процесс обучения. Наиболее скрытый и потенциально устойчивый способ, когда цифровой водяной знак является неотъемлемой частью знания, извлеченного моделью из специально подготовленного набора данных.

Наиболее перспективными для практического применения являются гибридные подходы, комбинирующие несколько уровней. Вложение ЦВЗ в латентные пространства или через подход управления на основе данных, что обеспечивает глубокую интеграцию с «знаниями» модели. Обнаружитель триггера может служить дополнительным механизмом, что позволит

легко подтвердить авторские права на модель без доступа к ее весам. Также, дополнением для комплексной методики вложения цифрового водяного знака в модели искусственного интеллекта может быть структурная маскировка на основе использования симметрий или псевдослучайных архитектурных решений для маскировки следов внедрения.

Список используемых источников

1. Subakan C. et al. Attention is all you need in speech separation // ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2021. С. 21-25.

2. Мударова Р. М. Противодействие атакам типа инъекция подсказок на большие языковые модели / Р. М. Мударова, Д. Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 5. С. 39-48. EDN: LVERMB.

3. Шариков П. И. Исследование атаки обфускацией на байт-код java-приложения с целью разрушения или повреждения цифрового водяного знака / П. И. Шариков // I-methods. 2022. Т. 14. № 1. EDN: GQGKIV.

4. Исследование и алгоритм предотвращения эксплуатации уязвимостей библиотеки журналирования Log4j в информационных системах Java-приложений / П. И. Шариков, А. Ю. Цветков, В. В. Сигачева, Л. К. Сиротина // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2023. № 4. С. 100-106. DOI: 10.46418/2079-8199_2023_4_19. EDN: BULSOH.

5. Adorante R. et al. Robust Watermarking of Tiny Neural Networks by Fine-Tuning and Post-Training Approaches // Symmetry. 2025. Т. 17. № 7. С. 1094.

6. Pautov M. et al. Probabilistically robust watermarking of neural networks // arXiv preprint arXiv:2401.08261. 2024.

7. Ngo A. T. et al. Persistence of backdoor-based watermarks for neural networks: A comprehensive evaluation // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2025.

8. Adi Y. et al. Turning your weakness into a strength: Watermarking deep neural networks by backdooring // 27th USENIX security symposium (USENIX Security 18). 2018. С. 1615-1631.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF EMBEDDING A DIGITAL WATERMARK IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS

Sharikov P.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper analyzes the structure of artificial intelligence models. Among the existing structures, those that can be points for potential embedding of a digital watermark are being considered. The possibility of embedding digital watermarks directly into the parameters or processes of generating artificial intelligence models is being investigated. The most suitable elements of the structure of artificial intelligence models suitable for embedding digital watermarks were presented. The advantages and disadvantages of each considered approach to embedding digital watermarks in artificial intelligence models were also presented.

Key words: language models, AI, digital watermark, AI

СОЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИКА ДАННЫХ

УДК 008.2
ГРНТИ 87.01.75, 14.91

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ЦИФРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Г. В. Абрамян

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

В статье рассматриваются технологии и средства построения и функционирования гибридных цифровых экосистем на основе генеративного искусственного интеллекта. Представлены основные концепции и принципы, регулирующие создание, деятельность и использование цифровых экосистем информационного пространства в РФ, уточнены понятия цифровая экосистема, цифровая платформа (ЦП), цифровые сервисы, выделены основные элементы функционирования ЦП. Рассмотрены современные архитектуры и решения, реализующие облачные функции и сервисы российских гибридных цифровых экосистем

экспериментальные правовые режимы, цифровая трансформация, генеративный искусственный интеллект, гибридные цифровые экосистемы, облачные технологии

Опираясь на экспериментальные правовые режимы в РФ и в соответствии с ФЗ № 258-ФЗ 31.07.20 г. МЭР РФ в 2021 году разработало концепцию управления и регулирования деятельности цифровых платформ/экосистем. В соответствие с концепцией МЭР РФ, цифровая экосистема (ЦЭ) – это основная модель современного бизнеса, в котором покупатель/клиент становится центральной фигурой потребления/обмена одной или нескольких групп товаров/продуктов/услуг/данных/ информации самой экосистемы или других производителей для удовлетворения личных потребностей по-

купателей/клиентов, например для обмена/получения/оплаты продуктов/еды, жилья, досуга/развлечения/ мониторинга и обеспечения личной безопасности. Основным элементом функционирования цифровой экосистемы является цифровая платформа (ЦП) – это модель организации бизнес-процессов, при которой заказчики/потребители продуктов/еды/услуг/товаров и производители/поставщики обмена продуктами/услугами/информацией связываются между собой на основе электронных/цифровых онлайн коммуникаций – цифровых сервисов (ЦС) ЦП. Основным элементом функционирования ЦП является интегрированная/гибридная облачная технологическая платформа (ТП) – набор многократно/многоуровнево используемых облачно-аппаратных и архитектурных компонентов – ИТ-инфраструктуры: 1) сбора и хранения данных, 2) ИТ-сервисов, 3) алгоритмов реализации прикладных решений, бизнес-логики, поддержки функционирования канальных приложений, 5) технологий/средств/ инструментов разработки и функционирования ЦП, 6) технологий/средств интеграции ЦП/ЦЭ, 7) технологий/инструментов аналитической обработки персональных данных пользователей ЦП/ЦЭ, 8) технологий/инструментов/средств обеспечения безопасности и быстродействия работы ЦП/ЦЭ.

Использование интегрированных/гибридных ТП позволяет реализовать комплексный подход и архитектурные облачные ИТ-решения, реализующие принципы, функции и сервисы гибридных экосистем: 1) автоматического масштабирования сервисами и услугами, 2) автоматизированного управления зависимостями при установке, обновлении и управлении библиотеками/пакетами ПО для минимизации конфликтов/снижения вероятности ошибок между разными версиями библиотек, установки некорректных зависимостей, упрощения процессов обновления пакетов и проверки компонентов на соответствие, удаление пакетов и всех связанных зависимостей, 3) автовосстановления/резервного копирования/аварийного восстановления гибридных экосистем в виде: 3.1) создания облачного резервного хранилища/копирования (ОРХК) и процедур восстановления/копирования изменяемых данных в случае необходимости, при этом измененные данные резервных копий периодически автоматически копируются в облако, 3.2) аварийного восстановления при котором сохраняется полная копия данных ИТ-инфраструктуры и контент реальных/виртуальных машин/серверов. Основными инструментами при этом являются сервисы BaaS (Backup as a Service) и DRaaS (Disaster Recovery as a Service). BaaS обеспечивают настройку гибридной экосистемы, безопасность и обновление системы ОРХК и ава-

рийного восстановления в соответствии с расписанием, DRaaS дублируют инфраструктуру/контент материнских виртуальных серверов центра обработки данных на дочерние/резервные площадки по выбранному расписанию. В РФ в настоящее время активно используются сервисы/услуги автовосстановления гибридных экосистем: Yandex Cloud Backup, который генерирует резервные копии, пофайлово восстанавливает данные виртуальных/физических машин/серверов, обеспечивает комплексное управление политиками. RTCloud, VK Cloud Disaster Recovery, LanKey, Cloud.ru в случае отказа гибридных экосистем или при наступлении форс-мажорных обстоятельств дублируют виртуальные серверы из основного центра в резервный по настроенному расписанию, в том числе на основе локальной (on-premise) инфраструктуры. Для этого: 1) на основе политик выборочной проверки и тестовых миграций периодически проводится мониторинг и оценка копий ИТ-инфраструктуры на резервных площадках, 2) осуществляется ревизия сохраненного контента/данных, 3) осуществляется поддержка актуальных политик аварийного восстановления контента.

Принцип автомасштабирования предполагает непрерывный мониторинг распределения нагрузки и анализ текущих условий работы гибридной экосистемы. При увеличении/уменьшении нагрузки/количества приложений инструменты/механизмы масштабирования пополняют/удаляют аппаратные ресурсы (серверы или виртуальные машины). Для этого комплексно анализируются различные пороговые метрики: от нагрузки на процессор и объема ОП до количества входящих/исходящих запросов в единицу времени и др.

Функция автоматического масштабирования гибридных экосистем позволяет мобильно управлять размерами аппаратных ресурсов/вычислительными мощностями в зависимости от актуальной сетевой нагрузки – количества активных приложений пользователей, например при обучении/выводе данных/настройке ИИ-моделей конкретных заказчиков, приложений, в том числе мобильных с переменной нагрузкой (WEB-сайты, системы обработки данных и пр.). На практике используется, как правило, два вида автоматического масштабирования: 1) автоматическое вертикальное с целью добавления/уменьшения количества ресурсов сервера (ОП, ядер) с завершением работы/перезагрузкой ресурсов, 2) горизонтальное – целью добавления/уменьшения количества серверов в кластере гибридной экосистемы без завершения работы/перезагрузки ресурсов, это обеспечивает одновременную обработку значительно большего входящего трафика запросов. Данная функция обеспечивает работу приложений пользователей даже при значи-

тельном изменении во времени количества пользователей и/или объема их данных, оптимизацию финансовых потерь при неиспользовании ресурсов, исключение неработоспособности ИТ-инфраструктуры в связи с перегрузками, реализацию непрерывного функционирования. В настоящее время для автомасштабирования гибридных экосистем используются: 1) российские Web Services на основе ИИ: 1.1) Яндекс.Облако, Т1 Облако – инструменты для хранения данных, виртуальной ИТ-инфраструктуры, управления приложениями/web-сайтами, 1.2) VK Cloud распределенный ресурс/платформа облачных ИИ-сервисов для создания приложений и работы с данными, 1.3) Selectel, Timeweb, Beget, Reg.ru, SprintHost, AdminVPS, Amvera Cloud облачный хостинговый сервис для разработки ИТ-приложений на основе контейнерных технологий, 1.4) YCF – сервис Яндекс работающий с языками программирования Bash, R, Python, C#, Node.js, PHP, Java и Go, 1.5) Advanced FunctionGraph от Сбера и его аналоги Lambda AWServices и Alibaba CFC, 2) встроенные сервисы зарубежных платформ и реализованных в РФ совместно с зарубежными партнерами Web Services на основе ИИ: 2.1) King Servers, 2.2) NeoServer, 2.3) Vscale, 2.4) Inoventica Service, 2.5) VPS от Reg.ru, 2.6) CloudMTS, 2.7) SberCloud которые позволяют управлять политиками автомасштабирования в зависимости от потребностей клиентов, 3) зарубежных провайдеров и платформ: 3.1) Amazon Web Services (AWS), 3.2) Microsoft Azure, IBM Cloud с публичным сервисом Virtual Private Cloud (VPC) – платформ для оптимизации разработки ИТ-приложений и управления контентом, 3.3) Google Cloud Platform (GCP) – общественного провайдера для решения вычислительных задач по аналитике данных на основе ИИ, 3.4) Oracle Облако, реализующего Software as a Service (SaaS), Platform as a Service (PaaS) и Infrastructure as a Service (IaaS) вычислительные платформы, 3.5) Dell Technologies Облако – гибридный облачный сервис для работы частной, публичной и периферийной ИТ-инфраструктур, 3.6) UpCloud – гибридный сервис с глобальной инфраструктурой для создания, развертывания и управления ИТ-приложениями, 3.7) DigitalOcean – хостинг, позволяющий создавать и размещать ИТ-приложения и сайты.

Современные гибридные цифровые экосистемы (ГЦЭ) на основе ИИ – это модели организации перспективного оказания услуг/бизнеса посткапиталистического общества на основе технологий облачных вычислений и основанные технологиях общественных/публичных и частных облаков, позволяющие управлять ресурсами, затратами, ИТ-нагрузками, а также обеспечивать безопасность данных. К наиболее безопасным российским ГЦЭ на основе генеративного искусственного интеллекта относятся платформы:

1) КРОК Облачные сервисы, «Облако 152-ФЗ, 2) Яндекс.Облако, 3) VK Cloud, 4) Beeline Cloud. КРОК ориентирован на работу с конфиденциальными данными в соответствии с повышенными стандартами безопасности на основе облачной платформы «Облако КРОК» и сервиса для создания и управления кластерами Kubernetes. Он спроектирован с учетом требований международных стандартов ISO, PCI DSS, GDPR, Федерального закона №152-ФЗ «О персональных данных» для размещения данных и поддерживает критически важные торговые/ финансовые/банковские сервисы. Менее защищенными аналогами КРОК по степени защищенности реализующими ГЦЭ с серверами на территории РФ в настоящее время являются: 1) Рег.облако, 2) Imeweb Cloud, 3) RTCloud.

Яндекс.cloud – это ГЦЭ на основе ИИ предоставляющая современному бизнесу доступ к облачным технологиям на основе ИИ-аналитики: кластеризации и детализации расходов, сбора, хранения, сортировки, анализа и визуализации рабочих/персональных данных, например по платежам, создания онлайн заказов/рабочих мест, управления коммуникациями, безопасностью, ИТ-инфраструктурой: виртуальными машинами, средствами и сервисами автоматизации ИТ-разработок, их мониторинга и тестирования, распределенными сетями, хранилищами данных.

VK Tech (ВК Цифровые Технологии) – это корпоративная ГЦЭ на основе ИИ для организации современного бизнеса и ИТ-разработки. ГЦЭ включает в себя модули: 1) VK Cloud – облачная среда/платформа для создания и управления корпоративной ИТ-инфраструктурой (содержит инструменты создания, хранения и обработки данных), 2) VK WorkSpace – сервисы создания электронно-цифровой рабочей среды (содержит почту, коммуникационную систему/мессенджер VK Teams, сервисы видеосвязи, распределенное хранилище данных с возможностями/функциями редактирования данных/контента/документов, 3) дата-сервисы Tarantool, Cloud Storage, VK Data Platform это коммуникационные межплатформенные сервисы для обмена данными между различными приложениями, системами, компонентами, системы хранения данных и платформы для работы с данными, 4) бизнес-приложения – сервисы автоматизации моделей бизнес-процессов, например финансового и оперативного управления. К примеру, VK Tax Compliance – платформа для налогового мониторинга, которая позволяет автоматизировать процессы информационного взаимодействия с ФНС, раскрывать бухгалтерскую и налоговую отчетность, VK Process Mining – анализирует данные из внутренних систем компании, например, ERP, HR и CRM-систем, SAP, 1C, IP-телефонии, баз, почтовых событий.

Beeline Cloud 2.0 – это и облачная корпоративная ГЦЭ и провайдер на основе ИИ для цифровой трансформации бизнеса с дата-центрами стандарта Tier III и выделенными каналами связи. Обеспечивает постоянную комплексную поддержку облачной ИТ-инфраструктуры, -аутсорсингом, -кибербезопасностью заказчиков/клиентов в соответствии с принципами MSP. В Beeline Cloud 2.0 входит интеллектуальный оркестратор VEGA для управления гибридной ИТ-инфраструктурой: 1) интеграции различных сред виртуализации (OpenStack, VMware и др.) в единую управляемую платформу, 2) оптимизирует использование ИТ-инфраструктуры, 3) адаптирует облачные сервисы в форматы товарных/продуктовых команд, архитекторов/разработчиков, 4) реализует автоматизированную конвейерную CI/CD методологию (Continuous Integration/Delivery) разработки ПО, объединяющую процессы интеграции, тестирования и развертывания кода в единый автоматизированный конвейер с целью оптимизации выпуска обновлений и повышения производительности работ в условиях апробирования экспериментально-правовых режимов в РФ [1].

Список используемых источников

1. Абрамян Г. В. Цифровая трансформация и сквозные коммуникации: социальные риски и права, факторы влияния и тенденции развития экосистем образования, политики и бизнеса / Г. В. Абрамян // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). СПб.: СПбГУТ, 2024. Т. 3. С. 233-238.

TECHNOLOGIES AND TOOLS FOR THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF HYBRID DIGITAL ECOSYSTEMS BASED ON GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abrahamyan G.
The Herzen State Pedagogical University of Russia Herzen University
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

This article examines the technologies and tools for building and operating hybrid digital ecosystems based on generative artificial intelligence. It presents the key concepts and principles governing the creation, operation, and use of digital ecosystems in the Russian information space, clarifying the concepts of digital ecosystem, digital platform (DP), and digital services, and highlighting the key elements of DP operation. It also examines modern architectures and solutions implementing cloud functions and services for Russian hybrid digital ecosystems

Key words: experimental legal regimes, digital transformation, generative artificial intelligence, hybrid digital ecosystems, cloud technologies.

УДК 338.001.36
ГРНТИ 06.52.45

АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ИНДЕКСОВ ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ

Г. В. Абрамян[1, 2], А. М. Атаян[3]

[1] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
[2] Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
[3] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Международные индексы цифрового развития служат важными инструментами для оценки прогресса стран в области цифровизации и технологий. Несмотря на различия в методологии и подходах к оценке, анализ индексов цифрового развития показывает, что цифровизация становится основным драйвером экономического роста.

цифровизация, индекс развития, оценка цифрового развития, методика оценки

На сегодняшний день существует несколько ключевых международных индексов, которые позволяют оценить уровень цифровизации, развитие инфраструктуры, государственных электронных услуг и готовность обществ к технологическим изменениям.

ICT Development Index (IDI) – это комбинированный индекс, разрабатываемый Международным союзом электросвязи (ITU) для оценки уровня развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в странах. Он был введен в 2009 году и с тех пор неоднократно обновлялся, последняя версия была утверждена в декабре 2023 года. IDI состоит из трех ключевых компонентов: 1) Доступ к ИКТ (ICT Access) – 40 % от общего индекса (оценивает инфраструктуру и возможность доступа к цифровым технологиям); 2) Использование ИКТ (ICT Use) – 40 % от общего индекса (измеряет, насколько широко и активно используются данные технологии населением); 3) Навыки в области ИКТ (ICT Skills) – 20 % от общего индекса (оценка уровня цифровых навыков населения) [1].

IDI помогает странам идентифицировать текущий уровень и возможности для развития ИКТ. Его использование позволяет оценивать прогресс и планировать стратегию развития в области цифровизации. Кроме того, индекс выявляет различия между развитыми и развивающимися странами, предостерегая о потенциальных «цифровых разрывах», которые могут по-

влиять на экономическое развитие. IDI за 2025 год подтверждает устойчивый прогресс в направлении всеобщей и значимой связи. Средний глобальный показатель вырос третий год подряд, при этом темпы роста наиболее высоки в странах с низким уровнем дохода. Однако сохраняются устойчивые различия, особенно в доступности и использовании ИКТ.

Индекс развития электронного правительства (EGDI) – это композитный индекс, разработанный ООН для оценки уровня цифровизации государственного управления в странах. EGDI оценивает три компонента: 1) Онлайн-услуги (Online Services) – качество и доступность цифровых услуг, предоставляемых государственными органами; 2) Телекоммуникационная инфраструктура (Telecommunication Infrastructure) – уровень развития сетевой инфраструктуры для поддержки цифровых услуг; 3) Человеческий капитал (Human Capital) – уровень знаний и навыков граждан, включая образование и подготовку в области информационно-коммуникационных технологий.

Этот индекс является важным показателем для оценки и сравнения развития электронного правительства в разных странах, он позволяет сориентироваться в том, насколько государство эффективно взаимодействует с гражданами через цифровые каналы. По результатам 2025 года можно сказать, что достигнут прогресс в области цифровизации, но многие страны все еще сталкиваются с проблемами, чтобы обеспечить доступ ко всем цифровым услугам и повысить уровень цифровых навыков населения [2].

Индекс сетевой готовности (NRI) позволяет оценить готовность страны к участию в глобальной сети и использованию ИКТ для повышения своего экономического и социального потенциала. Он был разработан Институтом Портуланса, обновляется каждый год, и состоит из оценки четырех основных областей: 1) Технологии (Technology) – оценивает доступность и использование технологий; 2) Люди (People) – измеряет у населения уровень образования и навыков в области ИКТ; 3) Управление (Governance) – оценивает качество политических и управленческих структур; 4) Воздействие (Impact) – измеряет влияние ИКТ на экономическую и социальную сферы.

NRI служит важным инструментом для оценки и сравнительного анализа готовности стран к цифровой трансформации и активному участию в глобальной экономике. Анализ результатов 2025 года показывает значительный прогресс, однако необходимо продолжать работу по улучшению

технологий, образования и управления, чтобы успешное использование ИКТ было обеспечено в будущем [3].

IMD World Digital Competitiveness Ranking – это ежегодный рейтинг, составляемый Институтом управления и развития (IMD), который оценивает способности стран к цифровой трансформации и конкурентоспособности в цифровой среде. Рейтинг базируется на анализе более 60 стран и рассматривает три основных компонента: 1) Знания (Knowledge) – оценивает качество образования, доступность цифровых навыков; 2) Технологии (Technology) – измеряет использование и доступность технологий; 3) Готовность к будущему (Future Readiness) – оценивает адаптивность бизнеса и инвестиции в цифровые технологии.

IMD World Digital Competitiveness Ranking предоставляет ценную информацию о том, как страны воспринимают и адаптируются к цифровым вызовам. Наблюдая за динамикой результатов, становится очевидно, что для сохранения конкурентоспособности необходим постоянный фокус на инновациях, образовании и цифровой инфраструктуре [4].

Глобальный инновационный индекс (GII) – это ежегодный рейтинг, составляемый Всемирной организацией интеллектуальной собственности (WIPO), который оценивает способности стран к инновациям и их успехи в этой сфере. Индекс анализирует почти 140 стран и используется как ориентир для правительства и бизнеса, чтобы проверить свои инновационные экосистемы. Хотя он охватывает инновации в целом, его цифровая составляющая (доступ к ИКТ, использование ПО, экспорт высокотехнологичных услуг) является определяющей. GII включает в себя около 80 показателей и базируется на двух основных категориях: 1) Входы в инновации (Innovation Inputs) – оценивают факторы, способствующие инновациям, такие как финансовые и человеческие ресурсы, инфраструктура и правительственная поддержка; 2) Выходы из инноваций (Innovation Outputs) – измеряют результаты инновационной деятельности, такие как научные разработки, технологические достижения и патенты.

С момента своего запуска в 2007 году GII стал ведущим мировым эталоном для измерения и сравнения показателей инновационной деятельности. Он признан Генеральной Ассамблеей ООН авторитетным источником информации для политики в области науки, технологий и инноваций. В 2025 году инвестиции в инновации в целом демонстрируют положительную динамику – за исключением венчурного капитала. Тем не менее, рост инвестиций в инновации находится на исторически низком уровне [5].

Глобальный индекс кибербезопасности (GCI) является инициативой Международного союза электросвязи (ITU) и оказывает влияние на оценку уровня готовности стран к обеспечению кибербезопасности. Индекс измеряет обязательства стран в отношении кибербезопасности, основываясь на пяти основных столпах: 1) Правовые меры (Legal Measures) – законы и регулирование, касающиеся киберпреступности; 2) Технические меры (Technical Measures) – реализация технических возможностей через государственные и частные организации; 3) Организационные меры (Organizational Measures) – национальные стратегии и организации, работающие в области кибербезопасности; 4) Развитие потенциала (Capacity Development Measures) – образовательные инициативы и программы повышения осведомленности; 5) Сотрудничество (Cooperative Measures) – партнерства между государственными и частными секторами.

Каждый из этих столпов включает в себя различные показатели, которые помогают оценить степень вовлеченности и готовности страны к киберугрозам. GCI крайне важен в контексте цифрового развития, так как оценивает юридические, технические и организационные меры стран по защите своей цифровой инфраструктуры. Однако Глобальный индекс кибербезопасности (GCI) не обновлялся с 2021 года в связи с необходимостью пересмотра методологии сбора и анализа данных [6].

Индекс цифрового качества жизни (DQL) оценивает уровень цифрового благополучия в странах по пять основным факторам: 1) Доступность интернета (Internet Affordability) – время, необходимое для обеспечения стабильного интернет-соединения; 2) Качество интернета (Internet Quality) – скорость и стабильность интернет-соединения; 3) Электронная инфраструктура (Electronic Infrastructure) – уровень развитости и доступности цифровой инфраструктуры; 4) Электронная безопасность (Electronic Security) – уровень защищенности и уверенности пользователей в цифровой среде; 5) Электронное правительство (Electronic Government) – уровень цифровизации государственных услуг и услуг. Индекс был разработан компанией Surfshark и охватывает более 120 стран, анализируя, как каждый из этих факторов влияет на общую цифровую жизнь. DQL предоставляет ценную информацию о том, как страны воспринимают и адаптируются к вызовам цифровой эпохи. Результаты 2026 года подчеркивают важность постоянных инвестиций в цифровую инфраструктуру и электронное правительство для повышения уровня жизни и конкурентоспособности стран на глобальной арене [7].

Индекс цифровой экономики и общества (DESI) – это инструмент, разработанный Европейской комиссией, который оценивает относительное положение стран ЕС по цифровым вопросам. Он включает в себя различные показатели, которые отражают уровень цифровизации в странах, анализируя их достижения в цифровой сфере с 2014 года. Начиная с 2023 года, DESI интегрирован в отчет «Состояние цифрового десятилетия» и используется для мониторинга прогресса в достижении цифровых целей. DESI складывается из пяти ключевых категорий: 1) Подключение (Connectivity) – оценивает доступность и качество интернет-соединения; 2) Человеческий капитал (Human Capital) – измеряет уровень цифровых навыков и образование населения; 3) Интеграция цифровых технологий (Integration of Digital Technology) – оценивает, насколько предприятия внедряют цифровые технологии; 4) Цифровые государственные услуги (Digital Public Services) – оценивает уровень цифровизации государственных услуг; 5) Права и безопасность (Digital Rights and Security) – включает безопасность личных данных и защиту прав пользователей в цифровом пространстве.

DESI предоставляет ключевую информацию для оценки цифровизации в странах ЕС. Результаты 2026 года указывают на значительный прогресс, но и на наличие ряда вызовов, требующих внимания для дальнейшего улучшения цифровой среды [8].

Различия между рассмотренными индексами заключаются в их целевой направленности, объектах оценки и том, на какие вопросы они пытаются ответить [9, 10]. Каждый индекс смотрит на цифровизацию под своим специфическим углом. Если нужно оценить инфраструктуру, то будет полезен индекс IDI. Если интересует состояние цифровизации госсектора, то данные предоставит индекс EGDI. Если надо проанализировать инвестиционную привлекательность и бизнес, то можно обратиться к индексам IMD или NRI. Если же надо исследовать защищенность, то нужно анализировать индекс GCI.

Современные актуальные индексы смещают фокус с доступа к технологиям на их воздействие на общество, экономику, окружающую среду и благополучие человека. Ответственное, инклюзивное и устойчивое цифровое развитие – вот новый критерий актуальности.

Список используемых источников

1. Measuring digital development. ICT Development Index 2025: официальный сайт. URL: https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/idi2025/ (дата обращения: 11.03.2026).

2. Индекс развития электронного правительства: обзор на сайте МосРегДата. URL: https://mosregdata.ru/article/e-government-development-index (дата обращения: 11.03.2026).

3. Benchmarking the Future of the Network Economy: официальный сайт Portulans Institute. URL: https://networkreadinessindex.org/analysis/ (дата обращения: 11.03.2026).

4. Индекс цифровой конкурентоспособности. Официальный сайт «Каталог статистики и мировых данных». URL: https://statbase.ru/datasets/indexes-and-ratings/digital-competitiveness-ranking/ (дата обращения: 11.03.2026).

5. Global Innovation Index. Официальный сайт. URL: https://www.wipo.int/en/web/global-innovation-index (дата обращения: 11.03.2026).

6. Global Cybersecurity Index. Официальный сайт. URL: https://www.itu.int/pub/D-STR-GCI.01 (дата обращения: 11.03.2026).

7. Digital Quality of Life Index. Официальный сайт. URL: https://surfshark.com/research/dql (дата обращения: 11.03.2026).

8. The Digital Economy and Society Index. Официальный сайт Европейского союза. URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi (дата обращения: 11.03.2026).

9. Атаян А. М. Сравнительный анализ глобальных индексов инноваций и связности для оценки перспектив развития цифровой экономики // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). Сборник научных статей IX Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х т. Санкт-Петербург, 2020. С. 610-615.

10. Атаян А. М., Гурьева Т. Н., Шарабаева Л. Ю. Использование глобального индекса связности для анализа перспектив развития цифровой экономики России // Государство и бизнес. Экосистема цифровой экономики: материалы XI международной конференции. СПб.: РАНХиГС, 2019. С. 94-98.

ANALYSIS OF INTERNATIONAL DIGITAL DEVELOPMENT INDICES

Abrahamyan G.[1, 2], Atayan A.[3]
[1]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
[2]The Herzen State Pedagogical University of Russia Herzen University
[3]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

International Digital Development Indices serve as important tools for assessing countries' progress in digitalization and technology. Despite the differences in methodology and approaches to assessment, the analysis of digital development indices shows that digitalization is becoming the main driver of economic growth.

Key words: digitalization, development index, assessment of digital development, assessment methodology

УДК 008.2
ГРНТИ 87.01.75, 14.91

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОГО ЖИЗНЕННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ И БИЗНЕСА

Г. В. Абрамян[1, 2], А. М. Атаян[3]
[1] Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
[2] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
[3] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются особенности построения инфокоммуникационного жизненного пространства на основе генеративного искусственного интеллекта в условиях цифровой трансформации экономики и бизнеса. Выделены особенности: 1) развития нормативной базы цифровизации, 2) защиты данных профилей граждан содержащихся в государственных ИС с учетом требований к цифровым технологиям типовой модели обработки электронных документов граждан. Рассматриваются особенности сбора личных/персональных, экономических и социальных данных в условиях формирования цифрового общества. Предлагается описание структуры профиля «цифрового гражданина» с учетом трехуровнего контура; 1) данных портала ЕСИА «Госуслуги», 2) данных сервиса ЕГРИП/ЕГРЮЛ, 3) данные/история посещения веб-страниц, патерны взаимодействия с сайтами, поисковые запросы, транзакции, другие скрытые параметры – цифровое наследие/ останки граждан, характеризующие цифровое поведение пользователя.

жизненное пространство, цифровые артефакты, цифровые останки, коммодификация, генеративный искусственный интеллект

С 01.03.2026 г. в РФ вводится в эксплуатацию ИС «Цифровой профиль гражданина». Ресурс разрабатывается для организации современного инфокоммуникационное жизненное пространство граждан (ИЖПГ), упрощения коммуникаций граждан с финансовыми структурами, торговыми центрами и магазинами, организации цифрового обмена данными которые будут содержаться и накапливаются в государственных ИС. 02.03.2026 г. для этого Правительство РФ утвердило постановление № 372, которое определило условия проведения эксперимента в период с 01.04.2025 г. по 31.12.2027 г. по повышению уровня цифровой защищенности государственных ИС федеральных органов исполнительной власти и подведомственных им учреждений. В рамках этого 18.03.2025 года был опубликован приказ ФСБ РФ № 117, в котором были рассмотрены новые требования к защите информации,

содержащейся в государственных ИС. Параллельно в 2025 году был принят ГОСТ Р 59999-2025 «Цифровой документооборот организации», который должен обеспечить переход к цифровым технологиям создания, использования и хранения документов.

Таким образом, в РФ осуществляется последовательное развитие: 1) нормативной базы цифровизации ИЖПГ для построения современной среды, 2) отечественных открытых социальных и закрытых корпоративных сетей и ресурсов интернет, 3) различных платформ, устройств, приложений, сервисов и технологий для граждан, работа которых будет направлена на сбор и формирование цифрового профиля/следа граждан. Современные социальные и экономические процессы и системы функционирования услуг и производств в РФ постепенно переходят на цифровую пост/технокапиталистическую модели сбора, хранения, обработки и использования персональных/личных данных, которая предполагает, что корпоративные, государственные и частные интернет-платформы, под которыми понимается широкий круг участников/компаний/акторов, способных агрегировать, собирать, хранить, обрабатывать и генерировать данные граждан [1], становятся активными организаторами и партнерами цифрового социального мониторинга, в том числе и становятся владельцами этих персональных данных. Цифровые активности (действия) людей в ИЖПГ глобальных/локальных сетей непрерывно оставляют данные (следы), но при этом пользователи, как правило, не имеют полного контроля над этими данными. Непрерывный сбор личных/персональных, экономических и социальных данных граждан сопровождается формированием цифрового профиля граждан, который в перспективе может быть использован ИИ для генерации «цифрового двойника гражданина» (ЦДГ) – виртуально-цифровой имитации «бессмертного» фантома/суррогата личности гражданина. Генерация, развитие, функционирование и цифровая утилизация/смерть ЦДГ ИИ может осуществляется на основе загружаемых и сохраняемых данных с одной стороны из систем формирования цифрового профиля граждан – платформ, которые собирают сведения о человеке, в том числе в случае ненадлежащего хранения из государственных информационных систем (например «Профиль цифрового гражданина» – ЦПГ системы единой аутентификации и идентификации – портала ЕСИА «Госуслуги». При этом в ЦПГ могут включаться персональные данные (ФИО, дата и место рождения, паспорт, ИНН, СНИЛС, место регистрации/проживания, телефоны, e-mail, сведения о заключении и расторжении брака и др.), финансовые данные: сведения о трудовой занятости, самозанятости, доходах, взносах, 2-НДФЛ, данные из ЕГРИП/ЕГРЮЛ, о соцвыплатах, пенсиях, мерах соцпод-

держки, маткапитале и др., имущественные сведения (недвижимость, транспорт в собственности, действующие обременения, водительские права и др., медицинские данные (полис медстрахования, данные об инвалидности, прикрепление к медучреждению и др.). С другой стороны, цифровой след граждан (ЦСГ) ИИ может собираться на основе анализа производимых человеком операции/действий: данные/история посещения веб-страниц, паттерны взаимодействия с сайтами, поисковые запросы, транзакции, другие скрытые параметры, характеризующие цифровое поведение пользователя. Такие данные и метаданные, например, геолокация, технические характеристики устройств, атрибуты, сопутствующие, например, особенностям ввода/обработки/передачи данных, данные просматриваемых изображений частично сохраняются как на пользовательских устройствах, так и частично могут быть зафиксированы и агрегированы для последующего анализа различными интернет-платформами. Совокупность подобной информации, включая историю поиска, переписку, фотографии и иные цифровые артефакты и при жизни и после смерти человека приобретает статус цифровых останков граждан (ЦОГ).

ЦОГ могут состоять из различных групп цифровых останков (средств, ресурсов, активов): 1) нематериально-духовных цифровых останков (например, лицензии на объекты авторского права гражданина, цифровые финансы (банковские вклады/долги); 2) данные об объектах недвижимости, земельных участках); 3) интеллектуальные права на культурную собственность (произведения искусства, кино/фото/ художественные и музыкальные произведения, тексты); 4) личные/персональные сведения/данные (личная переписка и дневники метаданные и др.). Источники и причины генерации/появления отчужденных цифровых останков граждан (ЦОГ) могут быть различными: начиная от «заброшенности» аккаунтов до ограничении прав доступа (локализации) гражданина от ресурса, хотя сам гражданин при этом возможно может и продолжает существовать в реальном физическом мире и кончая данными уже покойного гражданина, но которые сохраняются после его смерти – определяющие понятие цифровое наследие гражданина.

На практике зачастую невозможно однозначно идентифицировать причины появления ЦОГ, например, данные могли быть созданы либо размещены другими людьми или возможно были даже сгенерированны ИИ искусственно, например, чатботами/агентами. Однако в условиях активного распространении ИИ ЦОГ в виде цифрового двойника гражданина (ЦДГ) может начать/продолжить свою параллельную, виртуальную жизнь и развитие определяя уже «постсмертное» ИЖПГ. Таким образом, появляется воз-

можность реализации новой технологической индустрии социальной «трансценденции» ИЖПГ. В настоящее время на основе генеративного ИИ используя ЦОГ мы уже сейчас можем «оживлять» визуальный, звуковой, аудиовизуальный или голографический контекст/присутствие или представление граждан.

Анализ контента современного ИЖПГ, источников в СМИ, интернета показывает, что с одной стороны, например зарубежные СМИ и производители контента всегда тяготели к показу «трансценденции» – смерти и умиранию людей/героев, например по телевидению на западе постоянно показывают криминальные боевики, войны, катастрофы, в новостях постоянно освещают войны, конфликты и катастрофы, при этом ключевую роль играют смерти видных деятелей политики, культуры, искусства, непрерывным потоком идет увековечивание трагических событий. Процесс увековечивания людей в ИЖПГ активно использует данные прошлого, и они всегда направлены на обеспечение будущих взаимодействий, тем самым умерший/отчужденный/ тем самым увековечивает свое присутствие в настоящем и будущем. Современные интерфейсы цифровых воскрешений в ИЖПГ обеспечивают переосмысление личностей с целью создания правдоподобного и достоверного впечатления о жизни без фактического существования и средства массовой информации являются основными инструментами в стремлении человека сохранить как можно больше своего присутствия – бессмертия образуя в цифровой социальной сети/среде либо «фантомы» живых либо отчужденных/умерших HomoNexus. Воскрешения с помощью ИИ в ИЖПГ характеризуются: 1) яркостью действий, 2) связью с давними культурными устремлениями к посмертному опосредованному представлению и взаимодействию, 3) нелинейностью взаимодействия и требуют от пользователей готовности поверить в происходящее и принять искусственное создание HomoNexus.

Благодаря воскрешению с помощью ИИ, умершие перестают быть просто субъектами общения, а начинают активно взаимодействовать в ИЖПГ, например, общаться «своими» сгенерированными голосами с живыми и между собой. Таким образом, посредством технологического посредничества ИИ делает возможным строить инфокоммуникационное взаимодействие и отношения между живыми и мертвыми в реальном жизненном пространстве ИЖПГ. Во времена перестройки в СССР ИЖПГ СМИ, кино и телевидение было наполнено боевиками, криминальными новостями, фильмами в стиле хоррор, фэнтези, контентом об оборотнях и пр. Показ таких сюжетов долгое время в широком прокате ИЖПГ устрашал, запугивал, шокировал, вызывая у людей зрителей/читателей чувства ужаса, отвраще-

ния и шока фокусируясь на смерти, загробной жизни, зле, демоническом начале, тем самым, по сути, пропагандировалась смерть. С другой стороны, в сюжетах ИЖПГ можно было заметить и стремление людей преодолеть смерть, отвергнуть окончательность небытия. На современном этапе развитие контента в ИЖПГ мы видим уже не столько отрицание смерти, сколько сосредоточение на противостоянии смерти с помощью новых цифровых, в том числе интеллектуальных технологий. В настоящее время на западе технологии генеративного искусственного интеллекта (ГИИ) на практике реализуют как сами цифровые воскрешения, так и определяют пути эволюционирования социо/биотехнологий, идей техноконвергенции, которые идут рука об руку с другими трансгуманистическими экспериментами в области биотехнологий и нейронаук, научных инноваций, технологий и практики физического и виртуально-цифрового консервирования/погребения/воскрешения граждан в ИЖПГ, например, в том числе на основе цифровых профилей. Цифровые воскрешения граждан (ЦВГ) на основе ИИ позволяют рассматривать параллельно существующие социальные цифровые сообщества ИЖПГ – постсмертные сообщества граждан (ПСГ), развитие которых определяет цифровое/технологическое бессмертие граждан (ЦТБГ) на основе так называемых тана/некротехнологий (Т/НТ). Основными целями Т/НТ является достижение ЦТБГ, которое позволяет:1) изменить отношение граждан к отчуждению, физическим утратам и смерти, 2) гибко управлять цифровыми останками граждан, 3) решать, этические и эмоциональные задачи посмертной Т/НТ сферы, 4) управлять цифровым наследием граждан, 5) сохранять цифровые воспоминания и контент граждан, 6) укреплять цифровые связи с родными вне экзистенциально-событийных рамок физического бытия, 7) сохранять отчужденных/умерших граждан в качестве членов цифрового общества, 8) поддерживать с отчужденными гражданами «парасоциальные» контакты, отношения, связи и коммуникации, 9) заниматься улучшением сервисной Т/НТ практики, 10) обеспечивать уход за отчуждающимися/умирающими, информационно сохраняя и фиксируя цифровые воспоминания о сущности личности каждого гражданина.

Результатами ЦТБГ могут стать: 1) процессы социальной монетизации/коммодификации, 2) генерация новых форм социального отчуждения, например накопленных нематериальных/цифровых ресурсов граждан, 3) подчинение виртуальной/бессмертной жизни гражданина проприетарному накоплению финансовых активов. При этом в перспективе как целью, так и результатами коммодификации личности может являться процесс превращения профилей/данных граждан в цифровой «товар» как целиком (его понятий, образов, представлений, ценностей, целеполагания и пр.), так и его

отдельных черт – характера, воспоминаний, сознания, поведения и пр. При этом главным объектом присвоения/отчуждения могут быть уже не столько вещественные факторы деятельности или капиталы граждан как было при капитализме, а именно социальные и духовные факторы (персонификаторы воли, идентичности, социальные связи и пр.), которые могут присваиваться также как постепенно/последовательно и по отдельности, так комплексно одновременно и все вместе.

Список используемых источников

1. Абрамян Г. В. Цифровая трансформация и сквозные коммуникации: социальные риски и права, факторы влияния и тенденции развития экосистем образования, политики и бизнеса / Г. В. Абрамян // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). СПб.: СПбГУТ, 2024. Т. 3. С. 233-238.

FEATURES OF CONSTRUCTING AN INFOCOMMUNICATIVE LIVING SPACE BASED ON GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE ECONOMY AND BUSINESS

Abrahamyan G.[1, 2], Atayan A.[3]
[1]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
[2]The Herzen State Pedagogical University of Russia Herzen University
[3]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the specifics of building an infocommunication living space based on generative artificial intelligence in the context of the digital transformation of the economy and business. The article highlights the following aspects: 1) the development of a digitalization regulatory framework, 2) the protection of citizen profile data contained in state information systems, taking into account the digital technology requirements of a standard model for processing citizens' electronic documents. It also examines the specifics of collecting personal, economic, and social data in the context of the formation of a digital society. A description of the «digital citizen» profile structure is provided, taking into account a three-level contour: 1) data from the Unified Identification and Authentication System (ESIA «Gosuslugi»), 2) data from the Unified State Register of Individual Entrepreneurs (EGRIP)/Unified State Register of Legal Entities (EGRUL), 3) data/history of web page visits, patterns of interaction with sites, search queries, transactions, and other hidden parameters–the digital legacy/remains of citizens characterizing the user's digital behavior.

Key words: living space, digital artifacts, digital remains, commodification, generative artificial intelligence

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

НЕЙРОСЕТИ В СОЗДАНИИ РЕКЛАМНЫХ КРЕАТИВОВ: РИСКИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Г. В. Абрамян[1], Г. Р. Катасонова[2]

[1] Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
[2] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье анализируются ключевые риски и ограничения применения нейросетей при создании студентами рекламных креативов. Рассматриваются правовые вопросы, этические моменты и практические ограничения нейросетевых технологий. Определяются границы эффективности нейросетей в творческом процессе и необходимость сохранения человеческого контроля для создания качественной рекламы.

реклама, нейросети, правовые вопросы, дизайн в рекламе, студенты

Одним из маркетинговых инструментов, влияющих на конкурентоспособность продукта, создание гармоничной среды для привлечения внимания потребителей и построение визуальных коммуникаций, является реклама. Для студентов направления подготовки 42.03.01 «Реклама и связи с общественностью» дисциплина «Дизайн в рекламе» читается во втором семестре первого курса, на которой изучаются следующие темы: 1) визуальные основы: композиция, типографика, колористика, стилистика [1]; 2) современные форматы: инфографика, фотографика, семиотика изображений [2]; 3) креативные методики: техники генерации идей, анализа данных и принципы эффективного копирайтинга [3]. Полученные в результате изучения дисциплины навыки позволяют обучающимся создавать рекламные креативы/объекты, эффективные, запоминающиеся коммуникации, профессионально оценивать ключевые элементы визуальной идентичности: от элементов брендбука и графики до дизайна цифровых площадок.

В рамках изучения дисциплины «Дизайн в рекламе» студенты знакомятся с нейросетевыми технологиями, получают навыки формулировок эффективных промптов для генерации текста, изображений, создания рекламных креативов/объектов. Положительные стороны использования студентами в образовательном процессе нейросетей очевидны – это значительное снижение трудоемкости при разработке контента, презентаций, сайтов, логотипов, элементов фирменного стиля, инфографики и дизайн-проектов [4].

Однако, стремительное внедрение нейросетевых технологий имеет определенные проблемы:

– участились случаи плагиата, ВУЗы вынуждены внедрять детекторы AI-контента (например, Turnitin) и пересматривать критерии оценивания, выполненных курсовых и дипломных работ;
– возникает риск девальвации критического мышления – зависимость от готовых решений может снижать способность к самостоятельному анализу;
– ограничение творчества и проблемы с достоверностью информации;
– снижение критического мышления и мотивации к обучению;
– вопросы конфиденциальности и защиты данных;
– проблемы с авторскими правами;
– поиск баланса между полнотой информации и ее доступностью, структурированием данных и выделения наиболее значимых аспектов;
– подготовка и адаптация студентов к быстро меняющимся технологиям;
– грамотная интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ) в образовательный процесс для раскрытия творческих способностей студентов [5].

Разработка дизайн-проектов – это пространство для творческих экспериментов, где будущие специалисты по рекламе и связям с общественностью получают навыки создания креативных рекламных объектов. Многие студенты ошибочно полагают, что учебные проекты находятся вне юрисдикции законодательства о рекламе и это является заблуждением. Любой рекламный макет, созданный в рамках лабораторной работы или учебного дизайн-проекта должен соответствовать требованиям Федерального закона «О рекламе» [6]. В противном случае студент рискует сформировать неправильные профессиональные навыки, которые в будущей профессиональной деятельности приведут к штрафам и другим неприятным последствиям.

При разработке рекламных креативов/объектов (интеллект-карты, инфографика, евробуклеты, презентации, сайты, логотипы, мерчи, баннеры и прочее) и при выполнении итоговых дизайн-проектов с использованием сервисов ИИ основными вопросами, требующих решения являются:

– правовые (авторское право, использование данных);
– этические дилеммы (дискриминация, манипуляции);
– практические ограничения технологий (качество, шаблонность);
– подготовка и адаптация студентов к быстро меняющимся цифровым технологиям [7];
– грамотная интеграция технологий ИИ в образовательный процесс для раскрытия творческих способностей студентов.

Понимание законодательных ограничений на этапе обучения – это не просто сдача зачета по дисциплине, а формирование профессиональной компетенции, которая спасет будущих работодателей от многомиллионных штрафов, а самих студентов – от репутационных рисков.

Реклама в РФ одна из самых регулируемых сфер и студентам необходимо научиться работать в правовом поле. Особое внимание законодательство уделяет товарам, которые могут нанести вред здоровью, а также предметам, ассоциирующимся с вредными привычками, которых нельзя использовать в любых рекламных материалах:

– изображения сигарет, папирос, сигар;
– процесс курения;
– курительные принадлежности: трубки, сигаретная бумага, зажигалки;
– никотинсодержащая продукция: вейпы и жидкости для них, кальяны;
– ограничения на косвенную рекламу, где изображение стакана или бокала может быть расценено как пропаганда употребления алкоголя (изображение бокала с красной жидкостью, даже если по замыслу это томатный сок, может быть расценено иначе, если нет четкого указания на безалкогольную природу напитка);
– изображения процесса потребления алкоголя. Реклама крепкого алкоголя (водка, коньяк, виски) разрешена только в ограниченных каналах коммуникации (в печатных СМИ (журналах) для взрослых, на телевидении и радио с 23:00 до 07:00 по местному времени, в сети Интернет на специализированных сайтах с обязательной системой возрастной верификации (18+), в местах розничной продажи алкоголя) [6].

Разработка логотипа, фирменного стиля, сайта или рекламной презентации в России в 2026 году перестала быть исключительно творческим процессом, так как с 1 марта вступил в силу ряд законодательных ограничений, которые напрямую влияют на визуальные и текстовые коммуникации бизнеса. Федеральный закон № 168-ФЗ [8] вводит новые требования, направленные на защиту и приоритетное использование государственного языка при разработке содержания на сайтах, указателях, вывесках. Иностранные термины и слова не исключаются полностью, но, в обязательном порядке, используются как дополнение к тексту на русском языке, который должен быть основным и таким же заметным, как иностранный.

Студенты при разработке вывесок, стендов и других рекламных элементов должны учитывать:

– коммерческие обозначения – слова и фразы на иностранном языке, например, «coffee», «sale», «open», «shop» должны сопровождаться русскоязычным аналогом: «кофе», «скидка», «открыто», «магазин»;

– рекламные материалы: баннеры, листовки, посты в соцсетях, видеоролики, содержащие иностранные слова, теперь требуют перевода, а перевод должен быть органично вписан в макет, а не вынесен мелким шрифтом в сноску;
– при обозначении услуг писать кириллицей слова, которых нет в словарях русского языка, нельзя. Услуги на сайте и в торговом зале «Female manicure», «Women's pedicure» должны быть переименованы в «Женский маникюр», «Женский педикюр».

Исключением являются товарные знаки и знаки обслуживания, прошедшие государственную регистрацию и фирменные наименования организаций, официально зарегистрированные в едином государственном реестре юридических лиц (ЕГРЮЛ).

Студенты, которые уже на этапе обучения научатся учитывать законодательные ограничения, будут значительно более конкурентоспособными на рынке труда, так как смогут не только создавать креативные макеты, но и аргументированно объяснять заказчику, почему те или иные визуальные решения невозможны с юридической точки зрения. Следовательно, при разработке рекламных объектов на занятиях по дизайну в рекламе необходимо уделять особое внимание не только творческой составляющей, но и юридической экспертизе готового продукта, формированию правовой грамотности.

Основные ограничения, которые необходимо учитывать обучающимся при разработке рекламных креативов на сегодняшний день: запрет на изображения табака, процесса курения и курительных принадлежностей; ограничения на рекламу алкоголя и косвенную пропаганду его употребления; запрет на рекламу VPN-сервисов и размещение на запрещенных платформах, требование приоритетного использования русского языка, запрет на рекламу услуг по написанию студенческих работ.

Использование студентами в учебном процессе нейросетевых технологий включает интеграцию различных креативных процессов, где необходимо сохранять человеческий контроль над смыслами, ценностями и этическими границами разрабатываемых креативов. Сочетание творческих экспериментов с пониманием законодательно-правовых правил РФ позволит подготовить востребованных специалистов, способных создавать эффективную и безопасную рекламу.

Список используемых источников

1. Катасонова Г. Р. Информационные технологии в дизайн-проектировании / Г. Р. Катасонова, И. Б. Дадьянова. Чебоксары, 2019.

2. Катасонова Г.Р. Информационные технологии в управлении дизайн-проектированием. Учебно-методическое пособие. СПб., 2020.

3. Катасонова Г. Р. Анализ работы с данными на основе использования ресурсов информационного пространства / Г. Р. Катасонова, А. С. Шкрум // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021). сборник научных статей: в 4-х томах. Санкт-Петербург, 2021. С. 228-233.

4. Катасонова Г. Р. Организация коммуникаций между студентами и преподавателями в условиях нарастания цифровизации общественного пространства / Г. Р. Катасонова, А. С. Шкрум // Культура, образование и искусство: традиции и инновации. Сборник статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции ученых-исследователей, специалистов, преподавателей вузов, колледжей, школ, учреждений дополнительного образования, руководителей образовательных учреждений, аспирантов, студентов научно-практической конференции, посвященной 110-летию нижегородского государственного педагогического университета имени Козьмы Минина. Нижний Новгород, 2021. С. 140-145.

5. Катасонова Г. Р. Использование нейросетей для разработки рекламных объектов / Г. Р. Катасонова, А. Д. Сотников // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2025). Сборник научных статей XIV Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 2-х томах. СПб.: СПбГУТ, 2025. С. 138-144.

6. Федеральный закон «О рекламе» от 13.03.2006 N 38-ФЗ (последняя редакция) https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_58968/ (дата обращения: 24.02.2026).

7. Digital environment of the university / G. R. Katasonova, A. S. Shkrum // Information Innovative Technologies. International Scientific Practical Conference. Moscow, 2021. С. 211-215.

8. Федеральный закон от 24.06.2025 N 168-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // КонсультантПлюс https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_508347/ (дата обращения: 12.02.2025).

NEURAL NETWORKS IN ADVERTISING CREATIVES: RISKS AND LIMITATIONS

Abramyan G.[1], Katasonova G.[2]
[1]The Herzen State Pedagogical University of Russia Herzen University
[2]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article analyzes the key risks and limitations of using neural networks in student advertising creatives. It examines legal issues, ethical considerations, and the practical limitations of neural network technologies. It also identifies the limits of neural network effectiveness in the creative process and the need to maintain human control to create high-quality advertising.

Key words: advertising, neural networks, legal issues, advertising design, students

УДК: 658.8
ГРНТИ: 02.15.61; 06.51.51

РАЗВИТИЕ РОССИЙСКО-КИТАЙСКИХ БИЗНЕС–КОММУНИКАЦИЙ НА ОСНОВЕ АКСИОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

И. А. Алексеенко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается аксиологическое основание китайской модели бизнес-коммуникаций – феномен гуаньси. Через призму зарубежных и российских исследований раскрываются сущностные характеристики гуаньси как системы социальных связей и социальной ответственности, оказывающих влияние на бизнес-процессы. Анализ ценностных оснований деловых коммуникаций, характерных для российской и китайской бизнес-моделей, позволяет предложить практические рекомендации для успешного партнерства и снижения репутационных рисков для субъектов российского предпринимательства.

аксиологический подход, феномен гуаньси, социальные связи, социальная ответственность, модели бизнес- коммуникации

Современные геополитические изменения привели к активному сближению России и Китайской народной республики, что выражается в беспрецедентно высоком уровне международных отношений между странами – стратегическому партнерству, проявляющемуся в политико-дипломатической, военно-технической, научно-технической, культурной и экономической сферах. Интенсификация экономических и торговых связей, реализация крупных совместных научно-технических проектов отвечает взаимным стратегическим интересам России и Китая, создавая условия для устойчивого политического и экономического развития на фоне противостояния с Западом.

В 2025 году Российская Федерация и КНР договорились всесторонне углублять многоплановое двустороннее практическое сотрудничество. В совместном заявлении, выпущенном в связи с 80–летием Победы Советского Союза в Великой Отечественной войне и Победы китайского народа в Войне сопротивления японской агрессии, отмечено стремление сторон обеспечить существенное качественное продвижение к 2030 году в таких сферах, как торгово-экономическое, таможенное, сельскохозяйственное,

транспортное, финансовое, промышленное, природоохранное взаимодействие, а также кооперация в области космической и спутниковой навигации, ядерной энергетики, городского строительства, здравоохранения, информационно-коммуникационных технологий [1].

Для реализации данной цели необходимо выстроить эффективную, устойчивую и долгосрочную коммуникацию не только между политическими структурами государств, но и бизнес-сообществами, что невозможно без учета ценностных основ, глубокого понимания культурных особенностей цивилизаций России и Китая, который предоставляет аксиологический подход.

Целью данной статьи является изучение возможностей применения аксиологического подхода для развития российско-китайских бизнес-коммуникаций в современных условиях. Анализ ценностных оснований деловых коммуникаций, характерных для российской и китайской бизнес-моделей, позволяет предложить практические рекомендации для успешного партнерства и снижения репутационных рисков для субъектов российского предпринимательства, в особенности только открывающих для себя китайский рынок.

Аксиологический подход предполагает рассмотрение коммуникаций через взаимосвязь духовных и материальных ценностей, которые определяются не только человеческим существованием, но и особенностями социальной, культурной, политической, экономической, технической, религиозной сред. Деловая культура Китая имеет свою глубокую ценностную специфику, уходящую корнями в историю и духовную жизнь страны, составляющую ее аксиологическое основание.

Аксиологическое основание – это система фундаментальных ценностей, принципов и убеждений, которая определяет, что считается плохим или хорошим, одобряется или осуждается в обществе, и тем самым служит моральным компасом и критерием для принятия решений, задает нормативные рамки поведения людей.

Таким аксиологическим основанием китайской деловой культуры является феномен «гуаньси» (关系). Прямого перевода на русский язык, и другие иностранные языки понятия «гуаньси» не существует, что и породило недопонимание и неправильную его трактовку. Традиционно это слово переводится как «социальные связи», но такой вариант затрагивает только один аспект его значения. Действительно, «гуаньси» состоит из связей, но очень специфичных как по форме, так и по содержанию, которые требуют обоюдных и взаимных обязательств между обеими сторонами. Эти связи подразумевают и благожелательность, и личную привязанность, и доверие,

и искренность. На особенности построения профессиональных межличностных отношений, основанных на доверии и профессионализме, обращали внимание ряд российских исследователей [2].

Цзян Г., Ло Т. В. и Гаррис К. П. рассматривают гуаньси с социологической точки зрения как воплощение институционализированного поведенческого паттерна межличностных отношений, связанного с эмоциональными компонентами человека и обязательствами человека в соответствии с конфуцианством и институциональной структурой [3].

Ряд исследователей рассматривают данный феномен как часть бизнес-процессов и коммуникативной культуры китайского общества. Так, Чень С.П. и Чень Ц.Ц. (Chen, X. P., & Chen, C. C.) считают, что гуаньси – это невидимый актив, не отражаемый в бухгалтерском балансе, но часто являющийся самым ценным активом китайской компании [4].

Луциянь Пэй (Lucian Pye), известный синолог, подчеркивал, что гуаньси – это моральный долг, в основе которого лежит фундаментальный принцип взаимности (bao, 报), который создает бесконечную цепь обязательств. Получить одолжение – значит оказаться в долгу, и этот долг должен быть возвращен, чтобы сохранить «лицо» и социальную репутацию [5].

Веселова Л.С. подчеркивает всеобъемлющий характер явления гуаньси как неотъемлемой, основанной на культурных традициях конфуцианства системы связей китайского общества. Китайцы превратили гуаньси в тщательно просчитанную науку: формирование и упрочнение неформальных связей является обязательной подготовкой для продавцов, менеджеров, чиновников и даже студентов колледжей. Более того, в каждой крупной компании в Китае всегда имеется сотрудник или целый отдел, который занимается налаживанием связей [6].

Рассмотрим возможности и ограничения, которые создает феномен гуаньси для развития российско-китайских деловых коммуникаций. Для этого сформулируем основные принципы, на которых должна строиться коммуникация бизнес-партнеров, и покажем их влияние на практику бизнеса.

Во-первых, необходимо понять, что для системы взаимоотношений в бизнесе, с точки зрения китайцев, считается хорошим и правильным, а что – осуждаемым и недопустимым. И здесь мы видим, что правильно – это ставить интересы «своих» (круга гуаньси) выше сиюминутной выгоды, выполнять свой долг («жэньцин»), быть верным своим обязательствам перед людьми, а не только перед контрактом. Недопустимо предать доверие, не отдать долг, поставить партнера по гуаньси в неловкое положение («потерять лицо») ради прибыли. Компания, известная тем, что она «портит гу-

аньси», теряет репутацию навсегда. Для китайских бизнесменов процветающий бизнес – это следствие правильно выстроенных и поддерживаемых отношений.

Во-вторых, концепция гуаньси – это мощнейшее моральное обязательство, которое стоит выше, чем юридическое. Чувство долга перед тем, кто вам помог, является мощнейшим внутренним стимулом к действию, а невыполнение этого долга вызывает чувство стыда и ведет к социальному остракизму. Сильные связи накладывают на человека ответственность за благополучие его круга. Успешный бизнесмен обязан «тянуть за собой» своих родственников, земляков, друзей, и это воспринимается как его моральный долг, а не как непотизм.

Для более глубокого понимания особенностей моделей деловых коммуникаций России и Китая, вызванных спецификой ценностных оснований деловой культуры двух стран, проведем их сравнение по следующим аспектам: главная цель, ключевой механизм коммуникации и драйвер принятия решений. Результаты анализа приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ моделей бизнес-коммуникаций России и Китая на основе аксиологического подхода

Аспект	Российская модель	Модель гуаньси
Главная цель	Достижение существенных, ясных, измеряемых результатов на основе установленного доверия	Построение долгосрочных, взаимозависимых отношений, сделка – начало отношений
Ключевой механизм коммуникации	Прямая фактическая вербальная коммуникация, меньший акцент на мягком построении отношений, допустима критика и возражения, но с учетом смыслов и контекста	Непрямая коммуникация для сохранения социальной гармонии, «лица». Первичен контекст, невербальные сигналы превалируют над вербальными. Частое избегание прямого «нет», возможны отказы через колебания
Драйвер принятия решений	Логическая аргументация, компетентность, личный авторитет доверенных лиц, доверие как необходимое условие. Отношения важны, но не так глубоки. Решения могут быть централизованы на верхнем уровне иерархии	Коллективная гармония, долгосрочная взаимность, сила личных связей. Отношения бывают важнее сделки. Решения принимаются на основе группового консенсуса, согласование может занимать длительное время

Таким образом, чтобы успешно развивать бизнес, российские и китайские партнеры должны учитывать особенности национальных моделей коммуникаций. Так китайским предпринимателям нужно быть готовыми:

– опираться на факты и логические аргументы, защищать свою позицию статистическими данными, количественными и качественными метриками;
– не принимать резкость и прямоту за враждебность, а прямую обратную связь расценивать как знак уважения, вовлеченности и серьезных намерений;
– строить личное доверие на основе последовательных действий, выполнения обещаний, что позволит перейти от формальных отношений к доверительным.

Российские бизнесмены должны учитывать роль и значение модели гуаньси в коммуникации с китайскими компаниями, а именно:

– уделять достаточное время построению деловых отношений, избегая давления;
– обращать внимание на контекст, т.е. как что-то сказано, а не только что сказано, уточнять, раскрывать истинный смысл;
– беречь «лицо», т.е. не критиковать публично, формулировать предложения косвенно, беречь репутацию партнера.

При углублении экономических связей между двумя странами важно глубоко понимать механизмы функционирования китайской бизнес-модели. Через изучение теории и практики аксиологических оснований китайского бизнеса, российские предприниматели смогут лучше адаптироваться к быстрому развитию сотрудничества между Россией и Китаем, установить прочные коммерческие отношения и достичь поставленных целей.

Список используемых источников

1. Совместное заявление Российской Федерации и Китайской Народной Республики о дальнейшем углублении отношений всеобъемлющего партнерства и стратегического взаимодействия в новую эпоху в ознаменование 80-летия Победы Советского Союза в Великой Отечественной войне, Победы китайского народа в Войне сопротивления японской агрессии и образования Организации Объединенных Наций Президент России. URL: http://www.kremlin.ru/supplement/6309 (дата обращения: 31.01.2026).

2. Гуриева С. Д., Джимиев П. Р. Социально-психологический феномен «гуаньси» как регуляторная функция поддержания социального капитала группы современного китайского общества // Современные технологии управления. ISSN 2226-9339. № 4 (96/1). Номер статьи: 96106. Дата публикации: 30.12.2021. URL: https://sovman.ru/article/96106/ (дата обращения: 31.01.2026).

3. Цзян Г., Ло Т. В. и Гаррис К. П. (2012). Формирование и развитие практики гуаньси и феномена гуаньси. Международный журнал криминологии и социологии, 1, 207–220. URL: https://doi.org/10.6000/1929-4409.2012.01.19 (дата обращения: 29.01.2026).

4. Chen, X. P., & Chen, C. C. On the intricacies of the Chinese guanxi: A process model of guanxi development. Asia Pacific Journal of Management, 2004. № 21 (3). pp. 305–324.

5. Factions and the Politics of Guanxi: Paradoxes in Chinese Administrative and Political Behaviour: The China Journal: Vol 34. URL: https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.2307/2950132 (дата обращения: 28.01.2026).

6. Веселова Л. С. Неформальные отношения (гуаньси) – проявление коррупционной деятельности или культурная специфика Китая? // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. 2014. Выпуск 7-2. ISSN 1997-292X. Тамбов: Грамота, 2014. № 7 (45): в 2-х ч. Ч. II. С. 32-36. URL: https://www.gramota.net/article/hss20141366/fulltext (дата обращения: 31.01.2026).

DEVELOPMENT OF RUSSIAN-CHINESE BUSINESS COMMUNICATION BASED ON AN AXIOLOGICAL APPROACH

Alekseenko I.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines the axiological basis of the Chinese business communications model – the phenomenon of Guanxi. Through the prism of foreign and Russian research, the essential characteristics of Guangxi as a system of social relations and social responsibility that influence business processes are revealed. The analysis of the value bases of business communications typical of the Russian and Chinese business models allows us to offer practical recommendations for successful partnerships and reducing reputational risks for Russian business entities.

Key words: axiological approach, guanxi phenomenon, social connections, social responsibility, business communication models

УДК 658.5
ГРНТИ 20.23.25

ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ И КОРПОРАТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Т. А. Андреева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Последние научные исследования подчеркивают роль цифровизации в повышении эффективности в области устойчивого развития компаний за счет большей подотчетности, эффективности цепочки поставок, вовлечения заинтересованных сторон и высокого уровня интернализации практики передового опыта. Тем не менее, большая часть этих исследований в первую очередь подчеркивает технологическое внедрение, а не изучение стратегической роли цифровизации во внедрении вопросов окружающей среды, социальных вопросов и управления в корпоративные функции, которые остаются недостаточно изучены. Устраняя этот пробел, это исследование исследует, влияет ли цифровизация на эффективность корпоративного устойчивого развития и как.

корпоративная устойчивость, эффективность цифровая, рынки с развитием

Цифровая революция глубоко изменила бизнес-операции, заставив фирмы применять стратегии, основанные на данных, для поддержания конкурентоспособности во все более динамичной среде [1, 2]. На переднем крае этого сдвига цифровая трансформация переосмыслила бизнес-процессы, настройку услуг и автоматизацию, побудив фирмы перераспределить ресурсы, внедрять инновационные бизнес-модели и укреплять вовлеченность заинтересованных сторон.

В то время как фирмы на продвинутых стадиях цифровой зрелости могут использовать цифровые инструменты для улучшения инноваций в части экологических, социальных и управленческих показателей устойчивости, те, кто находится на ранней стадии развития цифровых возможностей, часто сталкиваются с высокими затратами на внедрение, проблемами адаптации рабочей силы и структурной неэффективностью. Эти проблемы вызывают вопросы о том, следует ли рассматривать взаимосвязь между уровнем цифровой зрелости и эффективностью корпоративной устойчивости DM и CSE как нелинейную функцию. Существующие исследования признают, что цифровая зрелость может принести как преимущества, так и риски, включая уязвимости кибербезопасности, сбои на рынке труда и увеличение экологи-

ческих компромиссов [3]. Тем не менее, то, как DM развивается на разных этапах развития цифровых возможностей, и остается ли его влияние на эффективность устойчивого развития, следует нелинейной схеме, остается недостаточно изученным. Фирмы могут испытывать неэффективность на ранних стадиях, прежде чем реализовать преимущества в области устойчивого развития, что говорит о том, что подтверждает нелинейный путь развития. Для исследования зависимости предлагается использовать непараметрический метод, используемый для оценки относительной эффективности единиц принятия решений (DMU), в первую очередь в сценариях, включающих несколько входных данных и несколько выходов.

Неориентированный подход гарантирует, что как сокращение затрат, так и расширение производства будут рассматриваться одновременно, что делает его подходящим выбором для оценки эффективности внедрения экологических, социальных и управленческих показателей устойчивости по отношению к финансовым показателям. Кроме того, предположение использования переменных отдачи от масштаба допускает различия в операционном масштабе между фирмами, отражая неоднородный характер инвестиций в цифровизацию и их финансовое влияние.

Основной целью использования предложенной модели является определение оптимального масштаба для фирм в эффективном внедрении практики цифровизации по отношению к финансовым показателям. Эта модель обеспечивает подробную разбивку неэффективности в различных операционных масштабах, предлагая действенную информацию для руководства корпоративными стратегиями и оптимизации финансовых показателей. Модель дробного программирования неориентированного показана в формулировке (1–5) ниже:

$$Min\ CSE_f = \frac{1-\left(\frac{1}{m}\right)\sum_{i=1}^{m} s_i^- / x_{if}}{1+\left(\frac{1}{r}\right)\sum_{k=1}^{r} s_k^+ / y_{kf}} \quad (1)$$

где

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_{\mathrm{j}} + s_i^- = x_{if}, i = 1,2,\dots,m \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{kj}\lambda_j - s_k^- = y_{kf}, k = 1,2,\dots,r \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \quad (4)$$

$$\lambda_j\ , s_k^+, s_i^- \geq 0 \text{ для всех } i, j, k \quad (5)$$

В предложенной модели x_i обозначает входные параметры, в качестве которых были выбраны экологические, социальные и управленческие показатели устойчивости предприятия. Переменные s_i^- и s_i^- представляют собой входные излишки и выходной дефицит соответственно. Переменная λ_j неотрицательная переменная интенсивности, которая используется для построения идеального параметра единицы принятия решения с m входами и r выходами для n параметров единиц принятия решения. Уравнения два и три указывают входные и выходные уровни определения единицы принятия решения, как линейную комбинацию. Уравнение 4 накладывает ограничение через переменную возврата. Фирмы с показателем эффективности 1 находятся на границе, то есть они эффективно преобразуют усилия по устойчивому развитию в финансовую выгоду. Компании с оценками ниже 1 неэффективны, что подразумевает, что они недостаточно используют свои инвестиции в экологические, социальные и управленческие показатели. Чтобы изучить влияние индекса корпоративной цифровизации на эффективность корпоративной устойчивости планируется проводить путем панельного регрессионного анализа с помощью Stata.

С теоретической точки зрения исследование перспективно для привлечения внимания к цифровизации компании как к динамическому ресурсу, а не статическому технологическому активу. Кроме того, это исследование вносит теоретические идеи в эволюционную и адаптивную природу развития цифровых возможностей, эмпирически раскрывая нелинейную динамику отношений между цифровизацией и эффективностью корпоративной устойчивости. Первоначально фирмы сталкиваются с переходной неэффективностью из-за значительных инвестиционных требований, организационной инерции и сопротивления технологической интеграции. Однако со временем эти фирмы совершенствуют свои возможности, укрепляют свои поглощающие способности и систематически интегрируют цифровые инновации в свои стратегии, в конечном итоге реализуя значительные успехи корпоративной устойчивости. Эта нелинейная динамика обогащает теоретическое понимание, что преимущества устойчивости инвестиций в цифровые возможности развиваются динамически, а не мгновенно или предсказуемо.

С практической точки зрения это исследование предлагает критические последствия для корпоративных менеджеров, политиков и инвесторов, предоставляя эмпирически обоснованный, ориентированный на эффективность перспективу интеграции цифровизации в корпорации. Исследование

вводит строгий подход к бенчмаркингу, позволяющий заинтересованным сторонам систематически оценивать, насколько эффективно фирмы преобразуют инвестиции в финансовые и конкурентные результаты. Этот точный бенчмаркинг может информировать о принятии стратегических решений, позволяя менеджерам определить конкретные области для улучшения, особенно при балансировании затрат цифровизации с ожидаемыми преимуществами в области устойчивого развития.

Список используемых источников

1. Ван Вельдховен З., Вантиен Дж. Цифровая трансформация как перспектива взаимодействия между бизнесом, обществом и технологиями // Electron Mark. 2022. № 32. С. 629–644.

2. Ван Д., Xia X. Влияние цифровой трансформации на ценность фирм: изучение роли эффективности ESG и влияния информационного взаимодействия технологиями // J. Open Innov. Technol. Mark. Complex., 2024. № 30(4). С. 1236–1265.

3. Робертсоне Г., Лапина И. Цифровая трансформация как катализатор устойчивости и открытых инноваций // Business Process Management Journal. 2023. № 9(1). Статья 100017.

DIGITAL MATURITY AND CORPORATE SUSTAINABILITY

Andreeva T.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Despite extensive research on the relationship of a digital maturity and financial outcomes, very few studies have specifically explored how digital capabilities influence a company corporate sustainability efficiency. The present study presents working progress on utilizing Panel regression analysis to highlight the nonlinear dynamics of digital capability development, offering practical implications for firms aiming to optimize their sustainability strategies through effective digital transformation.

Key words: corporate sustainability, efficiency, digital maturity, digital transformation, sustainability performance

УДК 355.58
ГРНТИ 81.93. 21

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Н. Н. Бабин, С. А. Панихидников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Человек активно влияет на окружающую среду изменением ландшафта, вмешательством в биогеохимические циклы, изменением физическо-химического состава окружающей среды, созданием химических веществ, чуждых планете. Влияние этих воздействий осуществляется в локальном, региональном и глобальном масштабе, с различным характером взаимодействия друг с другом, с различной продолжительностью последствий. Загрязняющие вещества распространяются в воздухе, воде и почве. Природа обладает определенной способностью противодействовать влиянию негативных внешних условий, но многое зависит от нас и будущих поколений.

окружающая среда, загрязняющие вещества, распределение загрязняющих веществ в воздухе воде и почве, механизмы восстановления окружающей среды

Влияние человека на окружающую среду можно свести к трем основным направлениям. Первое заключается в искажении физико-химического состава среды через вмешательство в биогеохимические круговороты (углерода, азота, фосфора и металлов). Второе связано с изменением естественного рельефа и растительности для нужд урбанизации и сельского хозяйства. Третье – это насыщение биосферы ксенобиотиками – веществами, которые являются чужеродными для земных форм жизни [1].

В данной статье анализируется трансформация природной среды под влиянием указанных факторов в разных географических масштабах. Отдельное внимание уделяется их взаимодействию и длительности влияния на окружающую среду.

Одним из наиболее заметных проявлений такого воздействия являются изменения ландшафта. Они делают окружающую среду более восприимчивой к воздействию человеческой деятельности. Это связано с тем, что естественные экосистемы поддерживают высокое видовое разнообразие, которое утрачивается в однообразных техногенных зонах. Осушение болот и превращение рек в каналы лишают местность возможности самостоятельно очищаться от избытка биогенов. В результате экосистема теряет

устойчивость к эвтрофикации. В современных ландшафтах также меняется водный режим: из-за усиленного стока в период таяния снега в реки и озера попадает избыточное количество кислоты. Для многих водоемов именно этот сезонный скачок кислотности становится самым губительным последствием закисления. Кроме того, ландшафт служит путем для перемещения загрязнений, способствуя их переходу из атмосферных выпадений в грунт, а затем – в открытые водоемы. Изменение ландшафта также увеличивает парниковый эффект, поскольку уменьшение органического вещества в почве приводит к выбросу метана из-за повышения микробной активности [2].

Процесс самоочищения атмосферы и разбавления вредных примесей во многом обеспечивается активным перемешиванием воздушных масс и сильными ветрами. Воздушные потоки определяют дистанцию, на которую переносятся загрязняющие вещества: если частицы с высокой плотностью оседают в непосредственной близости от труб, то газы, пары и легкие фракции способны преодолевать огромные расстояния, измеряемые тысячами километров. Масштаб такого распространения зависит не только от метеорологических условий и силы ветра, но и от высоты расположения самих источников выбросов.

В ходе транспортировки первичные загрязняющие вещества попадают в воздух в виде газов, аэрозолей или твердых частиц. К ним относятся подкисляющие соединения, такие как диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NOx) и аммиак (NH_3), а также тяжелые металлы и стойкие органические продукты, возникающие при неполном сгорании топлива. В результате окислительных реакций в атмосфере формируются вторичные загрязнители, которые по своей агрессивности часто превосходят исходные вещества.

Глобальные изменения в биогеохимических циклах могут сказываться на состоянии природы сотни или даже тысячи лет. При этом само химическое воздействие сохраняется лишь до тех пор, пока вещество не разрушит свою структуру. Период нахождения различных газов в атмосфере крайне неоднороден. Летучие органические соединения распадаются крайне быстро – менее чем за час. Озон (O_3) и ключевые подкисляющие вещества способны сохранять свою структуру от нескольких суток до недель, а для фреонов (ХФУ) и закиси азота (N_2O) этот период может исчисляться годами. Переход данных компонентов из воздуха на почву или в воду обеспечивают три механизма. Один из них – влажное осаждение, при котором растворимые азотистые и серные соединения захватываются осадками и выпа-

дают вместе с дождем или снегом. Другой процесс, сухое осаждение, заключается в прямом поглощении газообразных примесей и частиц почвой, растениями или животными из проходящего воздушного потока. Третий – биологическая фильтрация, когда растительный покров механически задерживает переносимые ветром частицы [3].

Механизмы миграции соединений в гидросфере принципиально отличаются от процессов в атмосфере. Горизонтальный транспорт протекает значительно медленнее, а само распределение примесей осложняется физико-химическими взаимодействиями. В водной среде можно выделить четыре ключевых компонента с разной концентрацией загрязняющих веществ:

– чистая вода;
– организмы и взвешенный органический материал;
– поверхностная пленка;
– донные отложения.

То, как вещества распределяются между этими зонами, зависит от их физических свойств. Многие токсиканты почти не растворяются в воде, но зато легко смешиваются с жирами (например, с маслами или эфирами). Поскольку ткани растений и животных тоже состоят из жиров, они начинают впитывать и накапливать в себе эти вещества. По этой же причине на воде образуется жирная поверхностная пленка, в которой концентрация опасных соединений очень высока, что позволяет липидорастворимым веществам свободно перемещаться на большие расстояния вместе с потоками проточной воды.

На перемещение вредных примесей в море сильно влияют течения, соленость и температура воды (температурные градиенты). От этих факторов зависит, пойдут ли загрязняющие потоки ко дну или начнут подниматься к поверхности. В спокойных местах частицы грязи быстро падают на дно, превращая донные отложения в ловушки для загрязнителей. Именно там сосредоточена основная масса токсичных соединений. На мелководье, где вода постоянно движется, эти вещества не лежат на месте – их снова вымывает из осадков и разносит по всей толще воды.

В почве транспорт токсикантов во многом определяется тем, насколько активно они могут перемещаться вместе с капиллярной влагой. Так как почвенный слой неподвижен, вода остается единственным способом транспортировки загрязняющих соединений вглубь. Скорость этого процесса задают размер почвенных частиц и сами характеристики загрязняющих веществ. В

песчаных грунтах или мелкодисперсных материалах, где практически нет органических веществ, миграция идет быстрее всего. В почвах, богатых плесенью или иными органическими материалами, липидорастворимые химические соединения прочно адсорбируются частицами грунта, из-за чего их движение резко замедляется. Водорастворимые примеси не задерживаются и быстро перемещаются вслед за подземными водами.

Глобальная хроматография – это процесс перемещения веществ на огромные расстояния, который объясняет, почему концентрация стойких токсикантов в природе снижается крайне медленно, даже если их давно не используют. Процесс заключается в том, что летучие вещества испаряются, но конденсируются из-за падения парциального давления, попадая в районы с более низкой температурой. Так по всему миру распространяются загрязнители, способные долго оставаться в атмосфере, хотя обычно их распределение носит лишь локальный характер. Например, фреоны (ХФУ) поднимаются в высокие слои воздуха, и из-за специфических температурных условий скапливаются над полюсами Земли. Другие газообразные соединения, такие как метан или углекислый газ, также распределяются в масштабах всей планеты. При этом углекислота покидает атмосферу только в процессе фотосинтеза или при растворении в водах океана, включаясь в естественные геохимические циклы [4].

Влияющие на окружающую среду вредные факторы могут усиливать или ослаблять воздействие друг друга, или оставаться нейтральными. Так, подкисление почвы вызывает или увеличивает вымывание металлов. Азотистые загрязнители воздуха вызывают одновременное подкисление и эвтрофикацию. Эвтрофикация приводит к увеличению органических отложений на дне. Последствиями этого являются снижение концентрации растворенного кислорода, а также совместная осадка различных химических веществ, которые связываются с отложениями. Парниковые газы, взаимодействуя с другими загрязнителями, вызывают глобальное потепление.

Временный ущерб окружающей среде сильно варьируется. Некоторые воздействия очень короткие, например, когда химическое вещество легко деградирует. Другие являются долгосрочными: изменение ландшафта из-за строительства дорог, зданий или иного расширения инфраструктуры превращается в масштабное вторжение в природу. Подобное вмешательство может сохранять свое влияние на протяжении десятилетий, становясь необратимым изменением природной среды.

Последствия антропогенного вмешательства в природную среду принято разделять на обратимые и необратимые. Человек уже создал много необратимых изменений: вымирание видов животных и растений, истощение природных ресурсов. Природа обладает определенной способностью противодействовать влиянию негативных внешних условий. Существуют механизмы отрицательной обратной связи, способные сбалансировать многие изменения. Они относятся как к абиотическим, так и к биотическим воздействиям. Способность физической и биологической среды вернуться в исходное состояние после возмущения называется устойчивостью. Механизм положительной обратной связи создает ситуацию, когда внешнее воздействие вызывает изменения, усиливающееся в окружающей среде. В некоторых случаях воздействие не оказывает большого эффекта до определенного уровня.

Наиболее фундаментальным воздействием на окружающую среду является изменение ландшафта. Застроенный ландшафт не меняется быстро. Биологические изменения в ландшафте могут в этой перспективе казаться менее долгосрочными. Тем не менее, культивируемому лесу потребуется много поколений, чтобы перейти в более естественное состояние. На водный ландшафт влияет не только восстановление, но и эвтрофикация и подкисление. Побережья сильно изменились из-за эвтрофикации. Побережья могут восстанавливаться быстрее, чем открытое море, если сокращаются загрязняющие выбросы вблизи прибрежной зоны. Точно так же меньшие по объему водоемы и озера могут восстановиться в течение одного или двух поколений, если приток питательных веществ будет уменьшен.

Важно знать, какие механизмы способствуют восстановлению окружающей среды. Некоторые механизмы хорошо известны базовыми физическими процессами. Разбавление является одним из таких механизмов. Содержание химических примесей в водоеме постепенно снижается за счет естественного обновления воды. Этот процесс происходит как при поступлении чистых потоков из водосборного бассейна, так и в результате постоянного обмена с окружающими водными массами. Медленный оборот вещества в биогеофизических циклах обеспечивает поглощение загрязнителей окружающей среды. Циркуляция химических элементов останавливается при их выпадении в осадок или переходе в связанные формы. Например, азот способен накапливаться в гумусовом слое почвы, а также адсорбироваться, превращаясь в молекулярный азот [5].

При этом экосистемы обладают способностью к восстановлению, если соответствующие виды сохранились в этом районе. При благоприятных условиях эти виды начинают активно размножаться и осваивать территорию, что делает возможным их воспроизведение и повторную колонизацию.

Большая часть воздействия на окружающую среду последних нескольких поколений будет очень долгосрочной. Понятно, что бы мы ни делали, наши дети будут жить в мире, уступающем нынешнему по уровню благосостояния среды и объему доступных природных богатств. Уровень биологического и ландшафтного многообразия неизбежно снизится. Кое-что из природного богатства можно вернуть, однако результат целиком зависит от приоритетов, которые выберут грядущие поколения.

Список используемых источников

1. Оценка воздействия на окружающую среду: учебное пособие / В. И. Стурман. СПб.: Лань, 2022. 352 с.

2. Стрельников В. В. Анализ и прогноз загрязнений окружающей среды: учебник / В. В. Стрельников, Н. В. Чернышева. Москва: ИНФРА-М, 2021. 338 с.

3. Самсонов В. Т. Обеспыливание воздуха в промышленности. Методы и средства: монография / В. Т. Самсонов. Москва: ИНФРАМ, 2021. 232 с.

4. Батракова Г. М. Экологический мониторинг и контроль источников негативного воздействия объектов окружающей среды: учебное пособие / Г. М. Батракова, Г. Т. Армишева. Пермь: ПНИПУ, 2021. 71 с.

5. Ветошкин А. Г. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учебное пособие / А. Г. Ветошкин, К. Р. Таранцева; под редакцией А. Г. Ветошкина. Москва: ИНФРА-М, 2022. 360 с.

SOME ASPECTS OF HUMAN IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Babin N., Panikhidnikov S.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Humans actively influence the environment by changing the landscape, interfering with biogeochemical cycles, altering the physical and chemical composition of the environment, and creating chemicals that are foreign to the planet. These impacts occur on a local, regional, and global scale, with varying degrees of interaction and consequences. Pollutants are distributed in the air, water, and soil. Nature has a certain ability to counteract the influence of negative external conditions, but much depends on us and future generations.

Key words: environment, pollutants, distribution of pollutants in air, water, and soil, mechanisms for environmental restoration

УДК 378
ГРНТИ 14.35.09

ЧАТ-БОТЫ И СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК: ИНТЕГРАЦИЯ ИНСТРУМЕНТОВ WEB 3.0 В ПРЕПОДАВАНИИ ИНОСТРАННЫХ ЯЗЫКОВ

А. Б. Булатова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В условиях цифровой трансформации образования актуализируется вопрос интеграции искусственного интеллекта в лингводидактическую практику. В статье анализируется потенциал чат-ботов нового поколения, многоязычных семантических сетей и языка запроса SPARQL к базам знаний. Показано, что использование визуализации, семантического поиска и промпт-инжиниринга, позволяющего формулировать сложные запросы на основе естественного языка, обеспечивает переход от лексического поиска к концептуальному анализу культурных и региональных фреймов, отвечая когнитивным особенностям поколения Z.

семантический поиск, Web 3.0, цифровая трансформация образования, обучение иностранным языкам

В эпоху ускоренной цифровизации глобальная сеть Интернет и развивающиеся технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ) радикально меняют профессиональную среду зарубежных регионоведов-специалистов, изучающих социально-экономические, культурные и политические процессы, одновременно трансформируя практику обучения иностранным языкам. Все большее значение в работе зарубежных регионоведов приобретают ИИ-аналитика, большие данные, геоинформационные системы, облачные сервисы и инструменты Web 2.0 и Web 3.0, что делает условия труда более гибкими, но при этом повышает требования к цифровой грамотности, являющейся неотъемлемой частью исследовательской готовности студентов. В этой связи интеграция современных инструментов в практику обучения иностранным языкам представляется обязательной для формирования у студентов готовности к реальной профессиональной деятельности в глобальных сетях знаний.

Данная трансформация напрямую связана с эволюцией веб-технологий, которые прошли путь от статичного потребления контента в Web 1.0 к взаимодействию в Web 2.0 и семантической персонализации в Web 3.0,

радикально изменив подходы к обучению иностранным языкам. Появление Интернета в 1991 году и бурное развитие компьютерных технологий, известное как Web 1.0 (1991 г. – начало 2000-х гг.) заложили основу для цифрового обучения иностранным языкам. Этот период характеризовался статическим контентом, созданным ограниченным кругом авторов, а пользователи выступали в роли пассивных потребителей. В обучении иностранным языкам в этот период предполагалось использование онлайн-словарей, просмотр записанных видеоуроков, чтение текстов в первую очередь для развития перцептивных умений – чтения и аудирования.

В 2005 году Т. О'Рейли популяризировал термин Web 2.0 [1], обозначив новую фазу развития Интернета, где ключевую роль стали играть социальные сервисы, пользовательский контент и взаимодействие (блоги, вики, подкасты, социальные сети). Данные изменения стимулировали коммуникативные практики: создание учебных блогов, веб-форумов, подкастов, социальных сервисов главным образом для развития умений письменной речи и говорения, то есть продуктивных видов деятельности, а также социо- и межкультурной компетенции, расширив границы класса за пределы школы или вуза.

Дальнейшее развитие Интернета и появление умных агентов, семантических цифровых и виртуальных 3D библиотек, виртуальных миров и лабораторий, интеллектуального поиска и интеллектуальных обучающих систем (Web 3.0) изменили восприятие и взаимодействие людей в сети, обеспечив в языковом образовании невиданную ранее персонализацию и адаптивность за счет анализа данных, семантического поиска, учитывающего контекст, и виртуальных сред погружения.

Современный Интернет является универсальной средой общения и рабочим инструментом специалистов, занятых аналитической деятельностью, включая зарубежных регионоведов. В то же время интернет представляет собой гигантскую библиотеку, где ресурсы разбросаны хаотично, представлены на разных языках и используют несогласованные системы индексации. Традиционные поисковые системы опираются на лексическое совпадение слов. Например, запрос «apple» в традиционном поиске дает несвязанные результаты (фрукт, компания), в то время как семантический поиск, опираясь на онтологии и базы знаний для распознавания контекста, связывает «яблоко» с деревом и «Apple Inc.» с «iPhone» и основателем компании С. Джобсом. Поэтому освоение современных инструментов на этапе обучения становится ключевым фактором формирования профессиональной готовности, обеспечивая эффективную работу в глобальных семантических сетях знаний.

В контексте языкового обучения необходимым представляется овладение студентами методами работы с BabelNet, представляющим собой многоязычный энциклопедический словарь с широким лексикографическим охватом терминов, а также семантическую сеть, которая связывает понятия и конкретные объекты реального мира (именованные сущности в терминах семантического веба) в обширные сети семантических отношений. Данный инструмент следует модели WordNet (разработанной группой NLP Принстонского университета лексической базы данных английского языка), основанной на понятии синсета (множества синонимов). Каждый синсет BabelNet представляет определенное значение и содержит все синонимы, выражающие это значение на различных языках. Это обеспечивает не только перевод, но и глубокий анализ культурных концептов, способствуя развитию критического мышления, социокультурной компетенции и информационной грамотности и делая обучение более ориентированным на профессиональную готовность зарубежных регионоведов. Каждое понятие в BabelNet сопровождается не только определением (глоссой), но и изображением, а взаимосвязи между словами позволяют установить гиперонимы (родовые понятия), гипонимы (видовые), антонимы и соотношение части-целое, позволяя выстраивать лексику в стройную систему. Особый интерес для исследователя представляет режим визуализации графа, доступный в BabelNet, представленный на рис. 1. В отличие от линейного списка, граф наглядно демонстрирует структуру семантического поля, позволяя изучать ассоциативную связь, что может быть использовано при анализе прототипических значений в языковом сознании носителей.

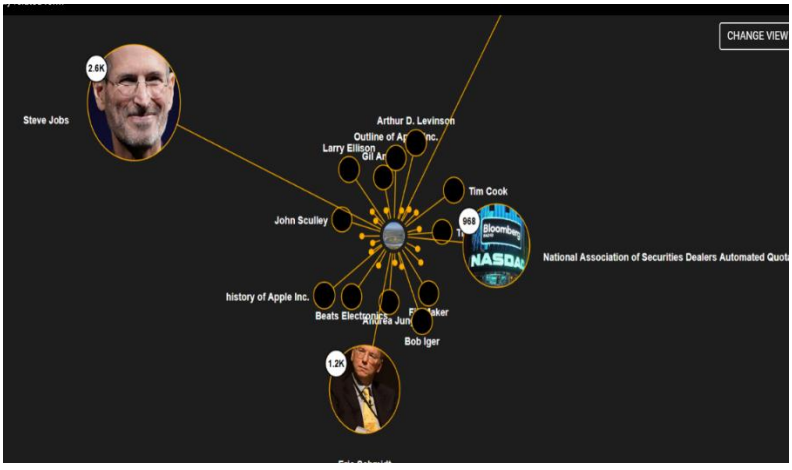


Рис. 1. Визуализация графа BabelNet

Так, визуализация понятия «Apple Inc.» позволяет идентифицировать ключевые элементы инфраструктуры (NASDAQ), персоналии (Tim Cook, John Sculley) и связанные компании, формируя целостное представление об

экономическом субъекте. Как показывают психологические исследования, не линейное чтение текста, а восприятие изображениями является доминирующим среди поколения Z [2]. Однако, в современном мире «экранной культуры» активное использование медиасредств сводит наглядность к визуальной демонстрации на экране, что приводит к формированию поверхностной осведомленности вместо фундаментального знания [3]. Инструменты, подобные BabelNet, позволяют создать модельную наглядность, которая обеспечивает более глубокое понимание, что ведет к конструктивному усвоению культурных фреймов и профессиональных компетенций в Web 3.0.

Одним из ключевых инструментов работы с семантическими данными, существенно расширяющим исследовательские возможности в цифровой среде, является SPARQL – язык запросов к семантическим базам данных, широко применяемый для структурированного извлечения знаний из онтологий, таких как Wikidata, DBpedia и YAGO. Данный инструмент формулирует паттерны связей между конкретными объектами реального мира в виде троек субъект – предикат – объект: например, Франция (субъект) имеет столицу (предикат) Париж (объект), возвращая результат в табличном, графовом или описательном формате, в зависимости от сформированного запроса (команды – SELECT, CONSTRUCT, DESCRIBE, ASK (не возвращает данные, только факт наличия или отсутствия результата) [4]. Это позволяет осуществлять сложные поисковые запросы, которые в условиях традиционного поиска требуют значительных временных затрат, как, например, извлечение из базы данных сведений обо всех президентах США, родившихся в том или ином штате. На рис. 2 представлен подобный запрос.

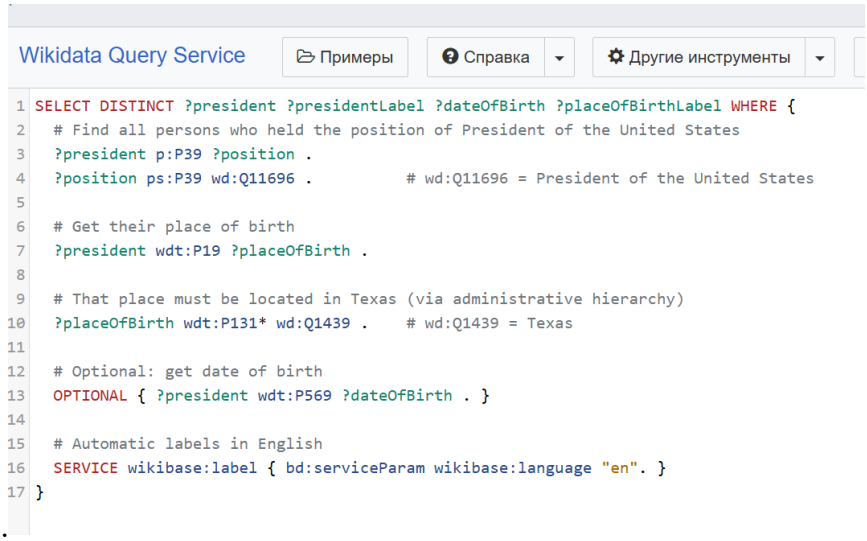


Рис 2. Структура SPARQL-запроса

Где SELECT DISTINCT указывает, что мы хотим получить уникальные комбинации значений перечисленных переменных (без повторений), переменные, начинающиеся с ?, – те данные, которые появятся в результатах, WHERE – содержит условия, которым должны удовлетворять данные. Эта, на первый взгляд сложная задача, требующая понимания не только лингвистической структуры вопроса, но и логической структуры целевой базы знаний (RDF-графа), может быть значительно упрощена за счет промпт-инжиниринга, который становится дополнительной ключевой компетенцией зарубежного регионоведа в цифровой экономике. Задачей промпт-инжиниринга является оптимизация текстовых инструкций (промптов) для моделей ИИ, чтобы получать точные и релевантные ответы. Для регионоведов, работающих с большими объемами данных, промпт-инжиниринг открывает новые горизонты, позволяя создавать, в частности, SPARQL-запросы, общаясь со ставшими уже привычными чат-ботами на естественном языке.

Таким образом, интеграция как самих чат-ботов, так и инструментария семантического поиска (BabelNet, SPARQL, промпт-инжиниринг) демонстрирует значимый потенциал для лингводидактики и подготовки бакалавров зарубежного регионоведения к работе в глобальных сетях знаний, позволяя переходить от лексического поиска к концептуальному анализу, визуализируя культурные концепты и региональные фреймы, что обеспечивает модельную наглядность и компенсирует дефицит глубинного понимания в эпоху экранной культуры. Встраивание промпт-инжиниринга в языковую подготовку зарубежных регионоведов позволяет им работать с большими данными, тем самым формируя ключевые компетенции цифрового исследователя в Web 3.0.

Список используемых источников

1. О’Рейли Т. What Is Web 2.0 // O’Reilly Media. 30.09.2005. URL: http://www.oreillynet.com/pub/a/oreilly/tim/news/2005/09/30/what-is-web-20.html (дата обращения: 27.01.2026).

2. Бектяшкина А. В. Когнитивные и поведенческие особенности восприятия новостного контента поколением Z //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. № 5-1 (104). С. 269-273.

3. Кожевников Д. Н. Современные особенности использования средств модельной наглядности в процессе обучения // Ценности и смыслы. 2018. №5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-osobennosti-ispolzovaniya-sredstv-modelnoy-naglyadnosti-v-protsesse-obucheniya (дата обращения: 20.01.2026).

4. Query Types and Clauses: AnzoGraph DB 2.5 // Cambridge Semantics. URL: https://docs.cambridgesemantics.com/anzograph/v2.5/userdoc/sparql-queries.htm#solution-modifiers (дата обращения: 27.12.2025).

Статья представлена заведующим кафедрой ИнЯз СПбГУТ, кандидатом филологических наук, доцентом А. С. Алешиным.

CHATBOTS AND SEMANTIC SEARCH: INTEGRATING WEB 3.0 TOOLS INTO FOREIGN LANGUAGE TEACHING

Bulatova A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Digital transformation of education makes integration of artificial intelligence into language teaching practice increasingly relevant. The article analyses the potential of new generation chatbots, multilingual semantic networks and the SPARQL query language for knowledge bases. It is shown in the use of visualization, semantic search and prompt engineering, which makes it possible to formulate complex queries on the basis of natural language, ensures a transition from lexical search to conceptual analysis of cultural and regional frames, while taking into account cognitive features of GeZ.

Key words: semantic search, Web 3.0, digital transformation of education, foreign language teaching

УДК 005:6
ГРНТИ 06.54.31

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

О. В. Волчик, В. В. Макаров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья освещает особенности управления качеством природоподобных технологий. Несмотря на их активное развитие и высокую востребованность сложность реализации природоподобных процессов ведет к необходимости разработки стандартов и обеспечению стабильности характеристик качества продукции и услуг, получаемых в ходе применения данных технологий. Целью статьи является обоснование единого подхода к управлению качеством, совместимого с требованиями промышленной практики и регуляторной среды.

управление качеством, природоподобные технологии, стандартизация, устойчивое развитие, экология, цикл Деминга

В настоящее время природоподобные технологии (ППТ) приобретают все большее значение в таких отраслях, как энергетика, сельское хозяйство, машиностроение, градостроительство и экология. Однако, процессы, связанные с их реализацией, являются сложными и нестабильными. Это приводит к трудностям их регламентации, а также снижает показатели качества производимой продукции и услуг.

Прежде всего обратимся к определению ППТ, данному президентом НИЦ «Курчатовский институт» Ковальчуком М. А. Согласно ему, ППТ представляют собой подход к разработке новых технологий, который вдохновляется формами, процессами и системами, существующими в природе. Такие технологии воспроизводят принципы, механизмы, процессы и свойства объектов живой природы в виде технических систем и технологических процессов, которые могут гармонично интегрироваться в природный ресурсооборот [1].

Говоря о принципах управления качеством ППТ, ученые прежде всего отмечают их способность моделировать процессы и структуры, существующие в природе, а также легко интегрироваться в экосистемы. Кроме того, ППТ обладают высокой степенью адаптивности и самоорганизации, что делает их экологически безопасными и ресурсосберегающими. Преимущества их применения связаны не только с повышением эффективности производства и экологической результативности, но и достижения зрелого уровня устойчивого развития за счет «мягкого» встраивания природных процессов в промышленную и социальную деятельность [2].

Классификация ППТ может осуществляться по различным критериям, например по принципу, типу используемых материалов, сфере применения или области правового регулирования (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Классификация ППТ [3, 4]

Критерий	Описание
По уровню подражания	
Форма	Копирование структуры (скоростной поезд-зимородок, структуры по типу сот, геотекстиль, имитирующий корневую систему)
Процесс	Копирование функции (самоочищающиеся покрытия, биологическое выщелачивание металлов)
Система	Копирование принципов всей экосистемы (промышленный симбиоз, замкнутые циклы)
По принципу проявления природоподобного эффекта:	
Энергосберегающие	Снижение энергоемкости
Ресурсосберегающие	Снижение металлоемкости машин
Экологически чистые	Снижение нагрузки на эко- и биосферу
По целям и задачам	
Тактические	Нацеленные на конечный продукт
Стратегические	Нацеленные на результат в средне- и долгосрочной перспективе
По материалу	
Использование естественных материалов	Применение натуральных компонентов или синтетических материалов со структурой и функциональностью, аналогичной природным.
Тип активного компонента	Природоподобные материалы делят на градиентные, газонаполненные, капсулированные, с жидкой матрицей, с дисперсным биологически активным наполнителем и др.
Принцип формообразования	Например, сотовые, сетчатые и складчатые материалы и конструкции, которые по своей форме повторяют природные
Этап жизненного цикла	Материалы, у которых природоподобный эффект проявляется при эксплуатации, диагностировании, ремонте или утилизации
По сфере применения:	
Сельское хозяйство	Использование агроэкологических методов, которые помогают восстановить биоразнообразие
Строительство и архитектура	Создание зданий, которые минимизируют потребление энергии и ресурсов, например, зданий, спроектированных с учетом природной вентиляции
Энергетика	Искусственный фотосинтез, ветрогенераторы по принципу полета птиц

Обратимся к исследованию существующей нормативной базы в области ППТ. В 2020 году Международным союзом охраны природы и природных ресурсов был разработан стандарт IUCN Global Standard for Nature-based Solutions, в котором изложены восемь критериев, позволяющих отнести различные технологические решения к природоподобным. Стандарт содержит подробное описание мероприятий по созданию ППТ, позволяющих улучшить их эффективность и устойчивость, а также служит базой для пользователей для оценки полезности ППТ при их разработке [5].

Также существуют стандарты, разработанные ISO в области экологической устойчивости, которые частично учитывают принципы ППТ. К ним относятся ISO 14044 «Экологический менеджмент – оценка жизненного цикла – требования и рекомендации» и ISO 14040 «Экологический менеджмент – оценка жизненного цикла – принципы и структура» [6, 7].

Говоря о российской нормативной базе, следует отметить Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», определяющий необходимость разработки и внедрения до 2030 года новых научно-технологических решений, в том числе основанных на ППТ [8]. Важным документом также является Указ Президента РФ от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации». Указ предусматривает необходимость определения перспектив развития ППТ, основных критериев отнесения технологий к природоподобным, а также оценку их состояния. Кроме того, в нем закрепляется важность разработки и утверждения дорожной карты и плана мероприятий в сфере ППТ [9].

Проведенный анализ демонстрирует, что порядок управления качеством ППТ недостаточно регламентирован и обеспечен необходимыми стандартами. Данный факт представляет интерес для дальнейших научных исследований в рассматриваемой области знаний.

Далее приведем цикл Деминга [10] применительно к ППТ для обеспечения процесса управления качеством рассматриваемых технологий на каждом этапе их реализации (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Цикл Деминга для ППТ

Этап	Необходимые мероприятия
Plan	Определить потребности заинтересованных сторон, в т.ч. функциональные и экологические требования, эксплуатационные условия, нормы и стандарты. Установить цели и показатели качества, такие как воспроизводимость параметров, устойчивость к внешним воздействиям, долговечность, безопасность, экологичность материалов, энергоэффективность. Выполнить аудит и определить ограничения: природные аналоги, проблемы материалов, возможные экологические побочные эффекты, регуляторные коллизии.

Этап	Необходимые мероприятия
	Разработать техническую дорожную карту, содержащую архитектуру технологии и ключевые компоненты, требования к подбору материалов. Определить риски качества и планы их минимизации: методики анализа риска, пороговые значения. Разработать план контроля качества и валидации. Спланировать прототипирование и пилотные испытания: цели, методики, критерии перехода к следующему уровню. Определить ресурсы, сроки, бюджет и ответственность. Подготовить документацию, в т.ч. требования к спецификациям, инструкции по процессам, протоколы испытаний, план изменений
Do	Реализовать прототип/пилотный образец в условиях, близких к реальным. Применить запланированные процессы качества: контроль входящих материалов, процессы производства/сборки, параметры технологических операций, сбор данных. Внедрить процесс управления конфигурациями. Выполнить запланированные испытания: функциональные тесты, тесты на устойчивость и воспроизводимость, экологические нагрузки. Вести перечень несоответствий и корректирующих действий. Обучать сотрудников методикам контроля качества и особенностям ППТ. Обеспечить прозрачность процессов посредством ведения записей: журналов, метрологических и калибровочных карт
Check	Провести анализ результатов испытаний и данных, а именно сравнение фактических значений с целевыми показателями качества, статистическую оценку отклонений. Обеспечить валидацию соответствия требованиям на предмет функциональности, безопасности, экологичности, надежности, повторяемости. Проводить аудиты процессов качества и производственных процедур на соответствие стандартам, точность калибровок, чистоту производственной среды. Проводить идентификацию причин несоответствий и вариаций, уточнять и фиксировать факторы отклонений. Оценивать риски повторений и вырабатывать меры по их снижению. Готовить рекомендации и выводы для этапа внедрения улучшений
Act	Внедрить корректирующие действия и устранить корневые причины несоответствий. Обновить рабочие стандарты и процедуры, спецификации, инструкции по процессам, план контроля. Перезапустить цикл PDCA с новыми условиями, повторно установить цели и разработать планы на основе полученного опыта. Обновить планы рисков, тестовые методики и показатели качества. Улучшить обучение и коммуникации, донести изменения до всей команды. Принять решение о переходе к следующему уровню: масштабирование пилота, переход к серийному производству, лицензирование/публикации методик

На основании представленного цикла можно вывести следующие практические рекомендации для обеспечения качества ППТ [11, 12]:

1. Каждый этап цикла должен опираться на биоинспирированные принципы устойчивости, такие как оценка жизненного цикла и возможность переработки материалов, поиск дополнительных видов энергии и ресурсов.

2. Цели в области качества должны фокусироваться на воспроизводимости и устойчивости, чтобы короткий цикл прототипирования приносил результаты, соответствующие заранее заданным условиям.

3. Показатели качества должны включать нормативные экологические требования и требования в области производственной безопасности.

4. Во избежание потери качества необходимо обеспечить разделение экспериментальных и промышленных условий.

5. Важно проводить верификацию на системном уровне, чтобы обеспечивать совместную работу отдельных компонентов в условиях реального применения.

ППТ представляют собой важный шаг к устойчивому развитию. Ключевые вопросы управления качеством в этой сфере включают в себя определение критически важных параметров для воспроизводимости функций ППТ, формирование единых методик тестирования и верификации, анализ применимости систем мониторинга и калибровки к природоподобным процессам, возможность интеграции регуляторных требований с гибкими инновационными решениями, оценку рисков, присущих внедрению ППТ в промышленность и способов их снижения.

Для постоянного улучшения качества ППТ необходимо дорабатывать законодательную базу, внедрять образовательные программы, а также создавать платформы для сотрудничества между государственными органами, научными учреждениями и бизнесом. ППТ требуют комплексного подхода к управлению качеством, который учитывает как экологические, так и экономические аспекты.

Список используемых источников

1. Ассоциация инновационных предприятий НБИКС технологий URL: https://nbics.org/ (дата обращения: 26.02.2026).

2. Природоподобные технологии: ключ к устойчивому будущему нашей планеты // Росконгресс URL: https://roscongress.org/materials/prirodopodobnye-tekhnologii-klyuch-k-ustoychivomu-budushchemu-nashey-planety/?utm_referrer=https %3A %2F %2Fwww.yandex.ru %2F (дата обращения: 26.02.2026).

3. Рудской А. И. Природоподобные материалы и аддитивные технологии их производства: монография / А. И. Рудской, А. А. Попович. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. 446 с.

4. Халтурина О. А. Развитие природоподобных технологий в России / О. А. Халтурина, Н. Е. Терешкина // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2024. № 5-1. С. 142-146. DOI 10.17513/vaael.3425. EDN: EXXCGQ.

5. Природоподобные технологии: ключ к устойчивому будущему нашей планеты // IUCN Global Standard for Nature-based Solutions URL: https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-En.pdf (дата обращения: 26.02.2026).

6. Национальный стандарт Российской Федерации «ГОСТ Р ИСО 14044-2019 Экологический менеджмент – оценка жизненного цикла – требования и рекомендации» от 19.09.2019 № 714-ст // Официальный интернет-портал правовой информации.

7. Национальный стандарт Российской Федерации «ГОСТ Р ИСО 14040-2010 Экологический менеджмент – оценка жизненного цикла – принципы и структура» от 25.03.2010 № 39-ст // Официальный интернет-портал правовой информации.

8. Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» от 28.02.2024 № 145 // Официальный интернет-портал правовой информации.

9. Указ Президента Российской Федерации «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации» от 02.11.2023 № 818 // Официальный интернет-портал правовой информации.

10. Национальный стандарт Российской Федерации «ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования» от 28.09.2015 № 1391-ст // Официальный интернет-портал правовой информации.

11. Поляков В. В. Природоподобные технологии как инновационный ответ на вызовы XXI века / В. В. Поляков // Экономика и экология территориальных образований. 2024. Т. 8. № 3. С. 27-33. DOI: 10.23947/2413-1474-2024-8-3-27-33. EDN: UOCYED.

12. Перспективные природоподобные технологии // Курчатовский геномный центр URL: https://genrussia.ru/prirodobodonie-tehnologii (дата обращения: 26.02.2026).

THE USE OF SMART TECHNOLOGY ELEMENTS FOR IMPROVEMENT THE UNIVERSITY EDUCATIONAL COURSES QUALITY

Volchik O., Makarov V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article substantiates the need to improve the university's educational projects through the use of new digital technologies. The model of pedagogical design is considered, on the basis of which it is proposed to carry out the transformation of the educational process, associated with changing requests and needs of the target audience. A description of the pilot educational project, a plan for its improvement and the tools being implemented, as well as quality level indicators based on the results of its implementation are given.

Key words: smart technologies, quality of education, information educational space, digital innovation ecosystem

УДК 004.8
ГРНТИ 28.23

ЭВОЛЮЦИЯ ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ: ОТ SEO К GEO

М. Б. Вольфсон

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена трансформации подходов к оптимизации продвижения контента в сети Интернет в условиях стремительного развития генеративного искусственного интеллекта. В работе рассматривается эволюция от традиционной поисковой оптимизации к новой парадигме – оптимизации под генеративные поисковые системы. В работе представлено сравнение ключевых характеристик поисковой и генеративной оптимизации, а также обзор основных генеративных поисковых платформ.

генеративный искусственный интеллект, генеративные поисковые системы, LLM, GEO, SEO, оптимизация контента

На протяжении более чем двадцати лет основная модель поиска информации в интернете основывалась на традиционных поисковых системах, которые выдавали пользователям ранжированные списки гиперссылок с короткими сниппетами. В таких условиях поисковая оптимизация (Search Engine Optimization, SEO) была основным инструментом, позволявшим сделать контент более заметным в интернете. Специалисты по интернет-маркетингу использовали методы SEO для повышения позиций сайта в органической выдаче поисковых систем (SERP), таких как Google, Яндекс и др., опирающиеся на сотни факторов ранжирования.

Однако развитие генеративного искусственного интеллекта (ИИ) коренным образом меняет взаимодействие пользователей с поисковыми системами. Генеративные поисковые системы (нейропоисковые системы), такие как Google AI Overviews на базе Google Gemini, Алиса AI на базе YandexGPT и др., анализируют запросы пользователей, собирая информацию из различных источников, а затем выдают ответы на естественном языке.

По данным исследования компании Gartner, к 2026 году объем традиционных поисковых систем сократится на 25 % из-за перехода пользователей на голосовых помощников с искусственным интеллектом.

В этих системах используются большие языковые модели (LLM), способные понимать контекст и семантику запросов пользователей, и давать ответ, который не требует от пользователя перехода по ссылке. Это искусственные нейронные сети, обученные на огромных массивах текстов, и способные понимать контекст, обобщать информацию и формулировать ответы, имитирующие человеческую речь.

Однако обычные LLM (Claude, DeepSeek и др.) дают свой ответ, опираясь на знания, полученные в ходе их обучения. Новую информацию они получают только после переобучения. Нейропоисковые системы, в свою очередь, не генерируют ответы из памяти, а опираются на внешние источники. Для улучшения ответов используется генерация с дополненной выборкой (Retrieval-Augmented Generation, RAG) – метод, который заставляет LLM сначала искать актуальную информацию во внешних, надежных источниках (базах данных, документах). Затем алгоритм ранжирует найденные источники по степени доверия, авторитетности, актуальности и структуре, а далее использует найденные данные для формирования ответа.

Краткий обзор основных генеративных поисковых систем представлен в таблице 1.

Оптимизация под генеративные поисковые системы (Generative Engine Optimization, GEO) – это комплекс мер по оптимизации содержимого, структуры и репутации сайта с целью повышения его цитируемости в результатах генеративных нейросетей. В отличие от SEO, он направлен на то, чтобы контент с наибольшей вероятностью отбирался, цитировался и использовался в ответах, генерируемых ИИ.

Идея GEO была впервые официально представлена в 2023 году. Авторы создали модель, которая показала, что оптимизированный с помощью GEO контент в 40 % случаев попадал в итоговый результат поиска по сравнению с неоптимизированным исходным материалом [1].

Генеративные системы оценивают и ранжируют контент по многоуровневой системе факторов.

1. Структура контента. Контент должен быть подготовлен таким образом, чтобы системы искусственного интеллекта могли легко его обрабатывать и извлекать из него ценные данные.

Для этого можно использовать структурированную разметку данных Schema.org разметка (JSON-LD), иерархическую организацию текста с помощью соответствующих заголовков и подзаголовков, таблиц, маркированных списков, блоки FAQ. Также ряд экспертов рекомендуют использовать

специальную микроразметку llms.txt, дающую LLM сжатое представление о содержании сайта.

Кроме того, контент, структурированный с помощью микроразметки (например, в формате «Часто задаваемые вопросы» или «Как сделать»), написанный на естественном языке в форме вопроса, идеально подходит для поиска и синтеза информации с помощью больших языковых моделей [2].

2.Авторитетность источника. Контент будет иметь максимальный эффект, если в нем будут ссылки на надежные источники, авторитетные мнения экспертов, цитаты и проверяемые статистические данные.

Для оценки качества и достоверности контента Google использует концепцию E-E-A-T (Experience, Expertise, Authoritativeness, Trustworthiness): «Опыт, Экспертность, Авторитетность и Надежность». Так, упоминания бренда на авторитетных площадках значат для ИИ зачастую больше, чем просто множество ссылок.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение основных генеративных поисковых систем

Название / Критерий	Функционал, особенности	Основные источники	Платные опции и тарифы (для частных лиц)
Google AI Overviews	ИИ-ответы поверх традиционной выдачи Google. Глобальный охват, быстрые обзоры	Веб, собственные данные Google, партнерские источники	Интегрирован в подписки Google One. Pro – 1 790 ₽/мес., Ultra – 22 490 ₽/мес
Perplexity	Контекстный поиск с акцентом на исследования и многоэтапное рассуждение. Подробные ответы с источниками, академический стиль, поддержка загрузки документов	Веб, академические базы данных, Reddit, YouTube	Education Pro – $5/мес., Pro – $17/мес., Максимум – $167/мес. (больше загрузок файлов, больше источников, проведение исследований, создание файлов, продвинутые модели)
Andi	Анонимный поиск с фокусом на приватность. Краткие фактологические ответы	Веб, соц. сети, Reddit, новостные агрегаторы	Нет, ожидается Andi Plus
Komo AI	Конфиденциальный AI-поиск без рекламы. Ответы на вопросы и проведение исследований. Поддержка AI-агентов	Веб, социальные сети, YouTube, партнерские источники	Essential – $20/мес., Plus – $50/мес. (неограниченный доступ, продвинутые модели, анализ данных, AI-агенты)
You.com	Кастомизируемый поиск с ИИ-ассистентом. Доступ	Веб, соц. сети, GitHub, arXiv, форумы	Pro – $20/мес., Max – $200/мес., (неограничен-

Название / Критерий	Функционал, особенности	Основные источники	Платные опции и тарифы (для частных лиц)
	к API для разработчиков. Поддержка AI-агентов		ное количество запросов и файлов, поддержка)
iAsk AI	Вопросно-ответный поиск. Акцент на точности и фактологичности, поддержка множества языков, доступ к API для разработчиков	Веб, базы знаний, экспертные источники	Pro – $9,95/мес. (анализ документов, генерация изображений, больше поисковых запросов)
Consensus	Академический поиск по рецензируемых научным статьям Анализ статей, создание резюме исследований, создание таблиц	Научные базы данных, публикации. Медицинские издания	Pro – $10/мес., Deep – $45/мес. (неограниченный поиск, больше загрузок файлов)
Felo	Мультиязычный поиск с созданием презентаций, изображений и веб-страниц. Проведение исследований. Поддержка азиатских языков. Поддержка AI-агентов	Глобальные источники на 100+ языках	Professional – $14,99/мес. (больше профессиональных поисков в сутки)
Sigma Chat	AI-чат и поисковая система. Анализ данных из таблиц, проведение исследований, создание изображений, написание текстов, поиск в Telegram	Веб, открытые датасеты, таблицы, Telegram	Plus – $14,99/мес., Pro – $60/мес. (неограниченные поиск, загрузка файлов и генерация изображений)
Алиса AI	ИИ-ответы поверх традиционной выдачи Яндекса. Глубокая интеграция с сервисами Яндекса. Поддержка русского языка, мультимодальные возможности, AI-агенты	Веб, Яндекс.Поиск, RuTube, VK Видео, YouTube, PDF-документы	Алиса Про (в подписке Яндекс Плюс) – 100 руб./мес. (расширенные функции)

При этом, как SEO, так и GEO в значительной степени опираются на E-E-A-T. Разница заключается в том, что поисковые алгоритмы оценивают эти факторы на основе обратных ссылок, показателей вовлеченности и авторитета домена, а генеративные системы интерпретируют их посредством распознавания сущностей.

Исследование, проведенное компанией Seer Interactive, показало, что включение в статьи ссылок, статистических данных и цитат повысило их видимость на 30-40 % по сравнению с исходными материалами, оптимизированными только для традиционного SEO [3].

3. GEO предполагает необходимость создания материалов, которые соответствуют запросам пользователей, сформулированным на естественном языке, и диалоговому характеру поиска. Поскольку люди все чаще задают длинные, развернутые вопросы, LLM будут выбирать те материалы, которые не только контекстуально и семантически согласованы, но и удобны для быстрого просмотра.

Таким образом, если в SEO ранжирование осуществляется с помощью обратных ссылок, релевантности ключевых слов, авторитетности сайта и пр., то GEO учитывает такие аспекты, как семантическая ясность, достоверность и структурная прозрачность, которые повышают вероятность включения результатов работы LLM в выдачу [2].

Сравнение SEO и GEO представлено в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение SEO и GEO

Параметр	SEO	GEO
Главная цель	Высокие позиции в органической выдаче поисковых систем и переход на сайт	Упоминание в ответах, сгенерированных ИИ. Цель – укрепление доверия к бренду.
Фокус оптимизации	Поисковый запрос, ключевые слова, метатеги, обратные ссылки, разметка, индексация	Сущности, факты, статистические данные, экспертные концепции
Тип запросов	Короткие, высокочастотные	Длинные, разговорные, смысловые
Где происходит видимость	Страницы результатов поиска (SERP)	Сводные данные, полученные с помощью ИИ, ответы в диалоговом режиме и генеративные ответы.
Формат контента	Страницы продукта/бренда	Кейсы, обзоры, исследования, дайджесты, подборки, рейтинги
Стиль вывода	Списки ссылок и краткие сниппеты	Разговорные, синтезированные ответы
Ключевые метрики	Позиции в SERP, время на сайте, трафик, CTR	Частота упоминаний, рост брендовых запросов после контакта с ИИ
Ключевой фактор успеха	Алгоритмическая релевантность, ссылочная масса	E-E-A-T, понятность, структурированное содержание
Структура контента	Улучшает индексацию и ранжирование	Незаменима для анализа данных ИИ и точного цитирования
Источники трафика	Поисковая выдача, переход по ссылкам	Генеративные ответы, ИИ-помощники, агрегаторы знаний, голосовые интерфейсы
Роль бренда	Ограничена узнаваемостью через позицию в выдаче	ИИ цитирует только доверенные и авторитетные источники
Поведение пользователя	Поиск, нажатие на ссылку, переход на сайт	Запрос, получение ответа. Перехода на сайт может не быть

При этом необходимо понимать, что поиск с использованием ИИ развивается как дополнительный канал традиционного интернет-поиска, а не как его замена. В этой связи GEO не заменит SEO, а дополнит ее, образуя синергию:

– SEO может использоваться для обеспечения высоких позиций сайта в результатах поиска, а GEO – для оптимизации контента для систем ИИ;
– по мере развития генеративных моделей и поисковых систем, контент, оптимизированный для обеих платформ, будет иметь больше шансов охватить более широкую аудиторию.

Список используемых источников

1. Aggarwal, P., Murahari, V., Rajpurohit, T., Kalyan, A., Narasimhan, K., & Deshpande, A. (2023). GEO: Generative engine optimization. arXiv preprint arXiv:2311.09735. https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.09735.

2. Mr. Vaivaw Kumar Singh, Dr. Kunal Sinha (2025). Generative Engine Optimization (GEO): Crafting Content for AI-First Search Interfaces. International Journal of Innovative Research in Technology (IJIRT), 12(8), 21-28.

3. Optimizing content for generative search engines resulted in +40 % visibility // Seer Interactive. 17.07.2024. URL: https://www.seerinteractive.com/insights/optimizing-content-for-generative-search-engines (дата обращения 20.01.2026).

THE EVOLUTION OF SEARCH OPTIMIZATION: FROM SEO TO GEO

Volfson M.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article focuses on the transformation of approaches to optimizing content promotion on the Internet in the context of the rapid development of generative artificial intelligence. It explores the evolution from traditional search engine optimization to the new paradigm of optimization for generative search engines. The article presents a comparison of the key characteristics of search engine optimization and generative optimization, as well as an overview of the main generative search platforms.

Key words: generative artificial intelligence, generative search engines, LLM, GEO, SEO, and content optimization

УДК 1(091):[130.121+17.023.3]
ГРНТИ 02.51.15

О «СОБСТВЕННОМ ВЫБОРЕ» В ПОСТУПКЕ СОГЛАСНО АРИСТОТЕЛЮ

А. Ю. Вязьмин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Аристотеля можно назвать «античным протофеноменологом». Его философия, балансирующая между метафизикой и наукой, повлияла на новоевропейскую философию вплоть до современности. Идеи Аристотеля о душе, уме и чувстве предвосхитили вопросы XX-XXI веков о субъекте и субъективности. В его теории этики моральный поступок совершается лично, однако его концепция общего чувства и божественного ума предвосхищает анонимность выбора. Моральный выбор формируется в обществе, вне которого теряет смысл.

этика, мораль, поступок, добродетель, философия Аристотеля

Традиционно в истории философии Аристотеля рассматривают либо в качестве основоположника науки, либо в качестве философа, чья мысль, интерпретированная богословами, дала начало средневековой схоластике. Однако по многим причинам его следует назвать и неким «античным протофеноменологом». Во-первых, идеи из его философии, имеющей явный баланс между метафизическими основаниями и эмпирической наукой, а заодно лишенной мистицизма, безусловно повлияли на критическую философию Канта, а через Канта – на феноменологию. Во-вторых, Аристотель дает самый первый в истории философии анализ времени через рассмотрение движения и опровержения Зенона Элейского. И, в-третьих, хотя философия Стагирита и не содержит проблематики субъекта и субъективности в картезианском и посткартезианском смыслах, его проблематика души (ψυχή), ума (νοῦς) и общего чувства (αἴσθησις κοινή) явно определяет ряд вопросов, с которыми сталкивается философия XX-XXI вв. И одним из таких современных вопросов, соотносящихся с этикой и общественным характером существования человека, оказывается вопрос о «кто» поступка, т.е. о «кто» действия в его моральном измерении: личности или безличности, сознающего себя субъекта или анонимной субъективности на глубинных уровнях не со-

знанного. Если перефразировать этот вопрос, то иначе можно спросить так: есть ли у морального поступка собственник этого поступка?

Безусловно, постнеклассическая философия XX и начала XXI века приготовила ответы на этот вопрос, причем многие из них легли в основу социологических моделей и социальных технологий. Однако все же интересно, насколько такой вопрос может быть близок философии Аристотеля?

Аристотель считал, что этика тесно связана с социальной жизнью. Он рассматривал человека как существо, которое по своей природе предназначено для жизни в обществе и участия в коллективной деятельности. Согласно знаменитому определению Аристотеля «человек по природе своей есть существо политическое» (1253 a 3) [1, 378], а это значит, что человек занят созиданием блага (τ’ἀγαθόν) в коллективе, обществе, где имеет место разделение труда.

По мнению Аристотеля, этика не просто подчиняется социальности, но сама формируется на ее основе. Аристотель утверждал, что вне общества человек не может стать моральным, так как именно общество определяет, что является должным поведением.

Если интерпретировать Аристотеля современным языком, то можно с некоторой натяжкой говорить, что моральность – это система ценностей, которая побуждает человека соответствовать общественным ожиданиям. Однако Аристотель не использует слово ценность, вместо этого он говорит о добродетели (ἀρετή, двух видов: этической и созерцательной), т. е. о чем-то таком, что, согласно его определению, с одной стороны является «складом» души (ἕθος τῆς ψυχῆς), а с другой – некой деятельностью души (ἐνέργεια τῆς ψυχῆς), целью (τέλος) которой является благо (τ’ἀγαθόν) (1114 b 28) [2, 108].

Чтобы моральность и социальность гармонично сосуществовали, Аристотель вводит понятие меры (количества) этической добродетели через меру блага как цели (τέλος) добродетели, поскольку о благе, согласно Аристотелю, следует говорить многозначно и посредством категорий [2, 59], т. е., в т. ч., и посредством категории меры (количества, ποσόν). Эта мера не позволяет человеку быть «чрезмерно» моральным, то есть выходить за рамки нравственных возможностей своего времени и общества, в этосе которого (ἕθος, «устой») благо определено в качестве «первой» энтелехии.

Следовательно, можно утверждать, что Аристотель также различает мораль и нравственность. Нравственное совершенство, по его мнению, может противоречить общественным устоям, в то время как моральное совер-

шенство заключается в том, чтобы придерживаться общепризнанной морали. Он пишет: «Добродетель … есть некое обладание серединой…» (1106 b 28) [2, 86]. Это означает, что для Аристотеля наилучший в этическом смысле человек – это не некое «абсолютно нравственное» существо, а тот, кто действует в рамках общепринятых устоев, не отклоняясь от них ни в сторону излишеств, ни в сторону недостатка.

В качестве ремарки можно указать на то, что в случае обозначения и «склада» души, и «устоя» общества в древнегреческом используется одно и то же слово ἔθος.

Если рассматривать этическую добродетель как действие души (ἐνέργεια τῆς ψυχῆς), то характер этого действия Аристотель объясняет через волю (βουλή), т. е. намерение или произвольное решение (βουλεύσις) о чем-то таком, что зависит от человека, но при этом имеет свойство вариабельности и неопределенности. В качестве частной иллюстрации Аристотель указывает на решение о средстве достижения цели (περὶ τῶν πρὸς τὰ τέλη, 1112 b 11) [2, 102], при некоторой неопределенности актуальной достижимости этой цели в окончательной (т. н. «второй») энтелехии.

Оба вида добродетели (этическая и созерцательная) схожи и цели их действий осуществляются близкими способностями души: рассудительностью (φρόνησις) и созерцательностью (διάνοια). В то же время обе способности по мысли Стагирита зависят от совместной работы двух частей души: общего чувства (αἴσθησις κοινή) и пассивного ума (νοῦς παθητικός), в своем теоретическом построении в основу этики Аристотель все-таки кладет учение о душе (Περὶ ψυχῆς).

Согласно Аристотелю душа есть форма как «первая энтелехия физического тела, обладающего в возможности жизнью» (412 a 28) [3, 395], в чьей юрисдикции находится способность живого тела иметь «начало (источник) движения в себе самом» [3, 375]. Поскольку душа – энтелехия тела, то части души – энтелехии органов (телесных орудий). Вообще, орудийность – родовая характеристика всех частей (способностей) души, даже тех, которые не являются телесными энтелехиями. К последним, нетелесным энтелехиям относятся общее чувство (αἴσθησις κοινή) и пассивный ум (νοῦς παθητικός). Из этого следует, что душа, по мнению Стагирита, по большей части неотделима от тела и смертна (кроме общего чувства и ума, которые отделимы от тела и потенциально бессмертны), Аристотель пишет об этом в конце первой главы второй книги «О душе» (413 a 5-7) [3, 396]. Примечательно, что, будучи сыном врача и анатома, Аристотель считал головной мозг лишь

некоторой железой, вырабатывающей жизненные соки. В свою очередь заявление Стагирита о смертности растительной и животной энтелехий души означает, что его естественнонаучный подход позволял ему утверждать, что после смерти душа не видит, не слышит, не осязает и т. д.

В юрисдикции растительных (вегетативных) энтелехий души находятся первичные «биологические» функции тела: питание, дыхание, рост, убывание и размножение. В юрисдикции животных энтелехий души находятся пять чувств. Общая схема движения (работы) органов пяти чувств состоит в создании отпечатка (оттиска, σημείον), при котором орган чувства принимает на себя форму ощущаемого без его материи. При этом энтелехия органа чувства еще и стирает эти отпечатки (восстанавливает status quo органов чувств).

Однако пять телесных чувств не есть «последнее чувствилище» (τὸ ἔσχατον ἀισθητήριον) [3, 427]. Общее чувство (из которого в будущем Кант сделает «внутреннее чувство») не связано с телом, не имеет органа, но воспринимает общие свойства и различия между чувствами. Общее чувство схватывает (принимает на себя, «принятие» – τὸ δεκτικόν) форму самого действия (ἐνέργεια) пяти различных чувств и его можно интерпретировать своеобразной рефлексией чувства (в более поздней традиции прочтения Аристотеля Лейбницем). С общим чувством также связано воображение.

Ум как способность души (пассивный ум, νοῦς παθητικός) тоже функционирует по принципу отпечатка (метафорически его действие Аристотель сравнивает со зрением, видением – «умо-зрение»), он отпечатывает умопостигаемую форму (любую форму), а значит (поскольку он «чист и ни с чем не смешан» по выражению Анаксагора) он сам не имеет никакой формы и существует сам по себе лишь в возможности: пассивный ум – это потенциальный ум. В действительности пассивный ум всегда принимает форму того, что он мыслит. Т. е. пассивный ум – это некая бесформенная первоматерия.

Как же пассивный ум может мыслить сам себя (как возможна рефлексия в уме), если он не имеет формы и существует сам по себе лишь в возможности? Ответ Аристотеля таков: во-первых, когда ум не отпечатывает в себе иное чем он сам умопостигаемое, то он сам себя и не мыслит, поскольку в действительности ум всегда принимает форму умопостигаемого. Во-вторых, ум мыслит сам себя привходящим образом (κατὰ συμβεβηκός) как возможность помыслить иное (τὸ ἄλλο) умопостигаемое. В «Метафизике» Стагирит замечает: «… ум через сопричастность предмету мысли

мыслит сам себя: он становится предметом мысли, соприкасаясь с ним и мысля его, так что ум и предмет его – одно и то же» (1072 b 21) [4, 310]. Из этого также следует, что все мыслимое пассивным умом – тоже составное третье (compositum, σύνολον), как и вещь: оно составлено из формы умопостигаемого и материи самого пассивного ума.

Деятельный, активный (всегда актуальный) ум (intellectus activus, νοῦς ποιητικός) – это одно из наименований Единого Бога у Аристотеля. Стагирит определяет деятельный ум как «форму форм», деятельность (ἐνέργεια), благодаря которой все приобретает форму. Таким образом, Аристотель предлагает достаточно симметричную онтологическую картину: с одной стороны «форма форм», единый Бог как вечная деятельность, а с другой – бесформенная первоматерия, существующая лишь в возможности.

Благодаря деятельному уму любая форма также может мыслиться пассивным умом, поскольку деятельный ум подобно свету транслирует умопостигаемую форму для создания ее отпечатка в пассивном уме. Формы деятельного ума существуют без материи. Деятельный ум существует вечно, он немыслим, невообразим, о нем «нет воспоминаний» (430 a 25, οὐ μνημονεύομεν δέ) [3, 436], поскольку он не подвержен никакому воздействию.

Когда Аристотель говорит о способностях души, проистекающих из совместной деятельности ума и общего чувства – а это созерцательность (διάνοια) и рассудительность (φρόνησις) – то здесь прослеживается отличие от деятельности ума как такового. Созерцательность, согласно Стагириту, связывает представления в единое целое, в то время как ум только схватывает умопостигаемую форму предмета. Рассудительность у Аристотеля даже противопоставляется (ἀντίκειται, «противоположна») деятельности ума, «ибо ум имеет дело с [предельно общими] определениями (ὅρος), для которых невозможно суждение, [или обоснование] (λόγος), а рассудительность, напротив – с последней данностью (τοῦ ἐσχάτου), для [постижения] которой существует не наука (ἐπιστήμη), а чувство (αἴσθησις)…» (1142 a 27-28) [2, 182]. Поскольку речь идет об общем чувстве, то можно сделать предположение, что в случае рассудительности (φρόνησις), согласно мысли Аристотеля, общее чувство (αἴσθησις κοινή) больше задействовано в совместной работе с активным божественным умом (νοῦς ποιητικός), нежели с пассивным. Косвенным подкреплением такого довода может стать утверждение Аристотеля о том, что принятие решения в этическом поступке и добродетели имеет также и эстетическую характеристику. В свою очередь такое

толкование позволяет рассматривать Стагирита в качестве предтечи учения Канта о способности суждения (Urteilskraft): созерцательность (διάνοια) тогда будет рассматриваться как прообраз кантовского взаимодействия способности суждения с рассудком, а рассудительность (φρόνησις) – с разумом.

Этическая теория Аристотеля – и это прослеживается в традиционной интерпретации – предполагает понятие преднамеренности (προαίρεσις) морального действия. Стагирит пишет о «собственном выборе» (κατὰ τὴν προαίρεσιν) в поступке и добродетели [2, 99], т. е. он не сомневается в «кто» (τίς) действующего морально, как и в его личном «складе» души (ἔθος τῆς ψυχῆς). Однако в этой концепции Аристотеля с учетом пересекающихся тем в «Метафизике» и в трактате «О душе» можно увидеть некоторый прообраз анонимности «кто» в этом, казалось бы, «собственном» нравственном выборе. Во-первых, поскольку в рассудительности общее чувство, как кажется, более взаимодействует с божественным умом, нежели с пассивным; во-вторых, божественный ум есть всегда ἐνέργεια (действие-состояние), а пассивный ум лишь отпечатывает мыслимые формы; и, наконец, в-третьих, «собственный» моральный выбор так или иначе формируется в обществе через принятие его устоев (ἔθος) и вне общества лишен смысла.

Список используемых источников

1. Аристотель. Политика // Аристотель. Сочинения: в 4-х т. Т. 4. М.: Мысль, 1983. 830 с.

2. Аристотель. Никомахова этика // Аристотель. Сочинения: в 4-х т. Т. 4. М.: Мысль, 1983. 830 с.

3. Аристотель. О душе // Аристотель. Сочинения: в 4-х т. Т. 1. М.: Мысль, 1976. 550 с.

4. Аристотель. Метафизика // Аристотель. Сочинения: в 4-х т. Т. 1. М.: Мысль, 1976. 550 с.

ABOUT “OWN CHOICE” IN THE ACT ACCORDING TO ARISTOTLE

Vyazmin A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Aristotle can be called an “ancient protophenomenologist”. His philosophy, balancing between metaphysics and science, influenced Modern European philosophy right up to the present. Aristotle’s ideas about the soul, mind and feeling anticipated the questions of the XX-XXI centuries about the subject and subjectivity. In his theory of ethics, a moral act is performed personally, but his concept of a common feeling and a divine mind anticipates the anonymity of choice. Moral choice is formed in a society outside of which it loses its meaning.

Key words: ethics, morality, action, virtue, philosophy of Aristotle

УДК 316.334.3
ГРНТИ 04.51.59

ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЕ И БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ФАКТОРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ЦЕННОСТЕЙ РОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА В XXI ВЕКЕ

А. Б. Гехт, К. Ю. Потаенкова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются видеонаблюдение и биометрические технологии как элементы трансформации ценностных ориентиров российского общества в XXI веке. Анализируется изменение общественных представлений о допустимости контроля, приватности и безопасности в условиях цифровизации. В работе используются материалы официальных источников и данные социологических исследований, что позволяет проследить, как технологии наблюдения и идентификации встраиваются в систему общественных ожиданий и норм.

ценности, видеонаблюдение, биометрия, общество, контроль, приватность, безопасность

Трансформация ценностных ориентиров российского общества в XXI веке проявляется в изменении отношения к безопасности, контролю и личным границам. Эти изменения особенно заметны в связи с распространением цифровых технологий наблюдения и идентификации, которые все активнее используются в управлении городским пространством и в обеспечении правопорядка. Центральное место среди таких технологий занимают системы видеонаблюдения и биометрические способы подтверждения личности, которые одновременно закрепляют безопасность как социальную ценность и обостряют дискуссии о приватности и допустимых пределах контроля.

Видеонаблюдение в крупных российских городах легитимируется в публичном дискурсе прежде всего через категорию безопасности. Так, в материале на официальном портале Мэра и Правительства Москвы прямо утверждается, что столица стала «одним из самых безопасных мегаполисов мира», а решающий вклад в профилактику правонарушений и снижение преступности вносит городская система видеонаблюдения; там же приводятся количественные параметры сети (порядка 230 тысяч камер) и указы-

вается, что с 2020 года на ее основе работает видеоаналитика с распознаванием лиц, с помощью которой установлены десятки тысяч людей, находившихся в розыске [1]. В этой парадигме визуальный контроль предстает, как социально-полезный и рациональный инструмент, подкрепляющий ожидание защищенности в публичных пространствах

Федеральные заявления о масштабе и назначении видеонаблюдения поддерживают ту же позицию. Российский государственный деятель, министр цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации Максут Шадаев, публично сообщал, что в стране работает более миллиона камер видеонаблюдения и каждая третья из них задействована в системе распознавания лиц [2]. Этот тезис воспроизводится и в материалах федеральных СМИ, где технология связывается с наблюдением за безопасностью в жилом секторе, общественных местах и на дорогах [3]. В результате ценностная связка, в которой видимость камеры ассоциируется с безопасностью, закрепляется не только на уровне городских практик, но и на уровне национальной повестки.

Мэр Москвы Сергей Собянин также неоднократно подчеркивал эффективность распознавания лиц. В публикации «РИА Новости» приводится его тезис о том, что система помогает задерживать преступников, находящихся в федеральном розыске [4]. В сообщении «Интерфакс-Россия» фиксируется и его оценка технологической точности (в контексте обсуждения качества распознавания лиц и автомобилей) как почти полной [5]. Подобные оценки демонстрируют, что для части представителей власти ключевой мотивацией выступает управленческая эффективность. Камеры рассматриваются, как способ сделать безопасность измеримой через анализ данных.

Однако, расширение наблюдения меняет и социальную чувствительность к границам личного пространства. Даже при высокой терпимости к камерам в общественных пространствах и в транспорте, реакция резко обостряется, когда наблюдение приближается к зонам телесной и личной автономии. Показателен случай, описанный региональными СМИ: в Ноябрьске посетители магазина заявляли в полицию из-за камеры в примерочной «Спортмастера» [6]. Независимо от итогов проверки, сам факт общественного резонанса показывает, что приватность не исчезает как ценность, она проявляется особенно остро там, где наблюдение воспринимается как потенциальное унижение или нарушение границ.

Критическая перспектива на видеонаблюдение и распознавание лиц формируется и на уровне гражданского общества. Одним из примеров явля-

ется позиция организации «РосКомСвобода», которая обращалась к теме рисков вмешательства в частную жизнь, доступа к биометрическим данным и необходимости гарантий безопасности хранения таких данных; в их публикации описывается правовая стратегия – попытка добиваться через суд моратория на использование распознавания лиц до появления достаточных правовых гарантий [7]. Здесь мотивация противоположна государственной, так как технология перестает трактоваться, как нейтральный инструмент и становится инфраструктурой потенциальных злоупотреблений и скрытого контроля.

Немаловажный пласт критики связан с применением распознавания лиц в политически чувствительных ситуациях. РБК описывает обращение в ЕСПЧ, где заявители оспаривали массовое распознавание лиц на митингах в Москве и указывали на риск сбора данных о тысячах граждан без их разрешения [8]. В таком контексте технология становится фактором трансформации гражданских ожиданий. Публичное участие и политическая активность могут переживаться как потенциально отслеживаемые, что затрагивает ценность анонимности в общественной жизни.

Важно отметить, что дискуссия о видеонаблюдении не сводится к противостоянию власти против общества. Внутри публичного поля встречаются и более дифференцированные позиции, в том числе в рамках правозащитной повестки. Так, на сайте Совета при Президенте РФ по развитию гражданского общества и правам человека опубликована позиция эксперта СПЧ Александра Брода о школьном видеонаблюдении с распознаванием лиц. Он прямо говорит о риске тотальной слежки, которая сама по себе «не гарантирует безопасность детей», и поднимает вопрос о соразмерности и смысле такого контроля [9]. Здесь критика концентрируется на принципе соразмерности, вместо абстрактной идеи приватности. Затрагивается вопрос того, оправдан ли контроль заявленными целями.

Параллельно с расширением видеонаблюдения, в России институционально оформляется биометрическая идентификация. Банк России описывает Единую биометрическую систему, как инструмент удаленной идентификации для доступа к финансовым и иным услугам, подчеркивая возможность подтверждать личность без личного присутствия [10]. Таким образом, биометрия встраивается в повседневность через ценность удобства цифровых сервисов, но при этом усиливает зависимость граждан от инфраструктуры хранения личных данных.

Социологические данные фиксируют противоречивость общественных установок. В аналитическом обзоре ВЦИОМ отмечается, что рост информированности о биометрии сопровождается улучшением восприятия биометрической идентификации, при этом остаются важными вопросы доверия к тому, как устроена система и как минимизируются риски [11]. Здесь проявляется характерная для современного общества амбивалентность: технологии одновременно воспринимаются, как новый стандарт безопасности и как источник потенциальной уязвимости при утечках или неправомерном доступе.

В итоге, видеонаблюдение и биометрические технологии формируют единое поле трансформации ценностей. С одной стороны, усиливается общественный запрос на безопасность и управляемость городской среды, а официальные лица легитимируют наблюдение через снижение преступности, рост раскрываемости и технологическую эффективность. С другой стороны, гражданское общество и часть экспертов апеллируют к рискам нормализации наблюдаемости, непрозрачности обработки данных и возможного использования распознавания лиц в политически чувствительных контекстах. При этом существует некий предел терпимости к видимости (например, к камерам рядом с примерочными). Таким образом, можно сделать вывод, что приватность остается значимой ценностью и проявляется особенно ярко в ситуациях, где контроль воспринимается, как вторжение в личные границы [6].

Следовательно, трансформация ценностей в условиях цифровизации в России выражается не в банальном отказе от приватности ради безопасности, а в сложном изменении понимания норм допустимого контроля. Технологии наблюдения и идентификации получают общественное одобрение в рамках парадигмы защищенности и удобства, но параллельно провоцируют запрос на правовые гарантии, прозрачность и соразмерность вмешательства в частную жизнь. Именно эта двойственность является ключевым признаком современной ценностной динамики.

Список используемых источников

1. Собянин: Москва стала одним из самых безопасных мегаполисов мира: // Официальный портал Мэра и Правительства Москвы (mos.ru). 05.03.2024. URL: https://www.mos.ru/mayor/themes/10847050/ (дата обращения: 02.02.2026).

2. Шадаев: В России работает более миллиона камер видеонаблюдения // Российская газета (rg.ru). 13.03.2024. URL: https://rg.ru/2024/03/13/shadaev-v-rossii-rabotaet-bolee-milliona-kamer-videonabliudeniia.html (дата обращения: 02.02.2026).

3. Шадаев рассказал о наблюдении за безопасностью в России с помощью камер: // РИА Новости (ria.ru). 13.03.2024. URL: https://ria.ru/20240313/kamery-1932753517.html (дата обращения: 02.02.2026).

4. Собянин рассказал о работе системы распознавания лиц в Москве: // РИА Новости (ria.ru). 16.12.2020. URL: https://ria.ru/20201216/sistema-1589482737.html (дата обращения: 02.02.2026).

5. Собянин: система распознавания лиц в Москве работает с точностью почти 100 % // Интерфакс-Россия (interfax-russia.ru). URL: https://www.interfax-russia.ru/moscow/main/sobyanin-sistema-raspoznavaniya-lic-v-moskve-rabotaet-s-tochnostyu-pochti-100 (дата обращения: 02.02.2026).

6. В Ноябрьске посетители магазина заявили в полицию из-за камеры в примерочной // Uralweb.ru. URL: https://www.uralweb.ru/news/society/458827-v-noyabrske-posetiteli-magazina-zayavili-v-policiyu-iz-za-kamery-v-primerochnoy.html (дата обращения: 02.02.2026).

7. РосКомСвобода через суд требует установить мораторий на использование системы распознавания лиц: // РосКомСвобода (roskomsvoboda.org). URL: https://roskomsvoboda.org/ru/post/roskomsvoboda-cherez-sud-trebuet-usta/ (дата обращения: 02.02.2026).

8. В ЕСПЧ подали иск о массовом распознавании лиц на митингах в Москве // РБК (rbc.ru). 06.07.2020. URL: https://www.rbc.ru/politics/06/07/2020/5efde4e69a79472b5e07ef32 (дата обращения: 02.02.2026).

9. Александр Брод: тотальная слежка за школьниками с помощью камер не гарантирует безопасности детей // Совет при Президенте РФ по развитию гражданского общества и правам человека (president-sovet.ru). URL: https://www.president-sovet.ru/presscenter/press/aleksandr_brod_totalnaya_slezhka_za_shkolnikami_s_pomoshchyu_kamer_ne_garantiruet_bezopasnosti_detey/ (дата обращения: 02.02.2026).

10. Удаленная идентификация и Единая биометрическая система // Банк России (cbr.ru). URL: https://www.cbr.ru/fintech/digital_biometric_id/ (дата обращения: 02.02.2026).

11. Биометрия – новый стандарт безопасности? // Аналитический центр ВЦИОМ (wciom.ru). URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/biometrija-novyi-standart-bezopasnosti (дата обращения: 02.02.2026).

VIDEO SURVEILLANCE AND BIOMETRIC TECHNOLOGIES AS FACTORS IN THE TRANSFORMATION OF VALUES IN RUSSIAN SOCIETY IN THE 21ST CENTURY

Geht A., Potaenkova K.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines video surveillance and biometric technologies as elements of the transformation of value orientations of Russian society in the 21st century. It analyzes changes in public perceptions of the acceptability of control, privacy, and security in the context of digitalization. The study uses materials from official sources and data from sociological research, which makes it possible to trace how surveillance and identification technologies are integrated into the system of public expectations and social norms.

Key words: values, video surveillance, biometrics, society, control, privacy, security

УДК 316.774
ГРНТИ 04.51.67

СОЦИАЛЬНЫЕ СЕТИ КАК ФАКТОР ТРАНСФОРМАЦИИ ЦЕННОСТЕЙ РОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА В XXI ВЕКЕ

А. Б. Гехт, К. Ю. Потаенкова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье анализируется влияние социальных сетей на трансформацию ценностных ориентиров российского общества в XXI веке. На основе данных ВЦИОМ, Росстата, аналитических материалов НИУ ВШЭ и научных публикаций рассматриваются изменения в процессах социализации, трудовых установках и отношении к публичности частной жизни. Показано, что социальные сети из канала коммуникации превращаются в самостоятельную структуру формирования ценностей, перераспределяя влияние традиционных социальных институтов и изменяя представления об успехе, труде и приватности.

ценности, российское общество, социальные сети, цифровизация, социализация, труд, публичность

Современные социологические опросы подтверждают, что интернет и цифровые платформы действительно стали частью повседневной жизни россиян. Согласно исследованию Левада-Центра, в марте 2024 года 81 % россиян выходили в интернет ежедневно, при этом среди молодежи до 24 лет этот показатель достигал почти 98 % [1]. При этом, три четверти опрошенных регулярно пользовались социальными сетями, а 59 % посещали их ежедневно или почти ежедневно. Наиболее активно россияне используют мессенджеры: примерно 80 % опрошенных сообщали об их использовании, а наиболее популярными среди них были WhatsApp (мессенджер WhatsApp принадлежит американской корпорации Meta, признана в России экстремистской) и Telegram. Эти цифры свидетельствуют о том, что цифровые коммуникации стали массовым феноменом, охватывающим значительную часть общества и формирующим ежедневный опыт миллионов людей в разных возрастных группах.

По данным ВЦИОМ, социальные сети и мессенджеры входят в число наиболее распространенных форм онлайн-активности населения и занимают значительное место в структуре потребления информации [1]. Данное

исследование позволяет рассматривать социальные сети как фактор, оказывающий влияние на формирование ценностных установок и моделей поведения, прежде всего, среди молодежи.

В этих условиях, особое значение приобретают социальные сети. Под социальными сетями в данной работе понимаются цифровые платформы, обеспечивающие создание персонализированного профиля, публичное взаимодействие и обмен пользовательским контентом (ВКонтакте, Telegram-каналы, Одноклассники и др.).

В начале 2000-х годов социальные сети рассматривались преимущественно, как средство коммуникации, но в настоящее время, они становятся пространством социализации, самопрезентации, трудовой активности и формирования общественного мнения. Это позволяет рассматривать их, как значимый фактор трансформации ценностной структуры общества.

Традиционно, процесс социализации осуществлялся через семью, систему образования и сферу культуры, однако в XXI веке цифровая среда существенно изменила распределение влияния между этими институтами. Так, по данным ВЦИОМ, социальные сети и мессенджеры входят в число наиболее распространенных форм интернет-активности россиян. Более половины молодых респондентов указывают интернет как основной источник информации о происходящих событиях [2]. Данное исследование говорит о том, что формирование представлений о морали и социально-одобряемых моделях успеха, все чаще, происходит в цифровой среде.

Особенность социализации в социальных сетях заключается в специфике самой цифровой среды. Информация в ней формируется при помощи алгоритмов, отбирающих контент в соответствии с интересами пользователя, а не случайным образом. В результате, человек оказывается в пространстве схожих мнений и установок, что усиливает эффект так называемого «информационного пузыря» и снижает вероятность столкновения с альтернативными точками зрения.

Одновременно, возрастает роль визуального контента. Образ успешности, все чаще, конструируется через демонстрацию стиля жизни, потребления, путешествий и внешней атрибутики благополучия. В этих условиях, меняется и сама структура авторитетов – влияние постепенно смещается от традиционных институтов (образования, науки, культуры) к блогерам и инфлюенсерам, чья популярность определяется степенью медийной видимости и эмоционального отклика аудитории. В этом случае, формальный статус лидера мнений перестает играть ключевую роль. Таким образом, соци-

альные сети становятся пространством социализации, самопрезентации, рабочей активности и формирования общественной повестки.

Новые формы распространения информации требуют особого контроля и порядка. В цифровом пространстве, где социальные сети и мессенджеры стали массовыми каналами коммуникации, немаловажным фактором воздействия на медиасреду выступает государственное регулирование. Российский регулятор связи, Роскомнадзор, не раз осуществлял контроль над работой мессенджеров и социальных платформ в соответствии с действующим законодательством. Так, в августе 2025 года ведомство частично ограничило возможность голосовых и видеозвонков в популярных мессенджерах Telegram и WhatsApp (мессенджер WhatsApp принадлежит американской корпорации Meta, признана в России экстремистской) в целях противодействия телефонному мошенничеству и другим преступным действиям, о чем официально заявлялось в пресс-релизах регулятора и сообщалось в СМИ [3]. Позднее ограничения на работу Telegram были расширены: с начала 2026 года Роскомнадзор начал последовательное введение технических мер, включающих замедление работы сервиса, поскольку, по мнению регулятора, мессенджер не устранил выявленные нарушения российского законодательства, включая недостаточную защиту персональных данных и недостаточные меры по противодействию нежелательному контенту [4].

Данные меры не были направлены на полный запрет платформы, а представляли собой частичные ограничения определенных функций при сохранении основной доступности сервиса. В официальных заявлениях Роскомнадзора подчеркивалось, что ограничения будут действовать до тех пор, пока нарушенные требования законодательства не будут устранены [5]. Влияние подобных мер на цифровую среду заключается в том, что они изменяют доступность платформ и частично перераспределяют активность внутри интернет-пространства, что сказывается и на моделях коммуникации, и на изменении ценностей пользователей.

Немаловажным проявлением трансформации ценностных ориентиров является изменение отношения к труду и профессиональной реализации. В условиях цифровизации экономики и развития онлайн-платформ еще более распространенными становятся гибкие формы занятости и индивидуальные трудовые траектории.

Аналитические материалы НИУ ВШЭ свидетельствуют о том, что цифровые платформы и онлайн-сервисы способствуют распространению нестандартных форм занятости и формированию новых моделей трудового

поведения [6]. Социальные сети в данном случае выступают, как инструмент позиционирования, поиска клиентов и формирования репутации. Данное изменение приводит к снижению ценности стабильной занятости и усилению ориентации на автономность и самостоятельное управление профессиональной деятельностью.

Ранее проведенные исследования Стребкова Д.О. и Шевчук А.В. также указывают на формирование в России электронной самозанятости, как специфической формы трудовой активности [7]. Таким образом, социальные сети оказывают влияние на трудовые установки, меняя представления о предпочитаемых формах профессионального пути.

Расширение присутствия социальных сетей в повседневной жизни сопровождается изменением отношения к границам частного и публичного. Тенденция публиковать личную информацию, связанную с семейной жизнью, досугом и настроением, становится распространенной и постепенно воспринимается, как социально допустимая.

Согласно данным Росстата, использование интернета и цифровых сервисов охватывает значительную часть населения и становится новой повседневной нормой [8]. В этих условиях публичность все чаще воспринимается, как естественный элемент социальной жизни, а приватность утрачивает статус всеобщей ценности. Это свидетельствует о глубинных изменениях в ценностной структуре общества, связанных с адаптацией к цифровой среде.

Подводя итог, стоит отметить, что социальные сети в XXI веке становятся значимым фактором трансформации ценностных ориентиров российского общества. Они влияют на процессы социализации, формирование представлений об успехе и труде, а также на отношение к публичности и частной жизни. Использование данных ВЦИОМ, Росстата и аналитических материалов НИУ ВШЭ позволяет сделать вывод о том, что социальные сети отражают происходящие социальные изменения и активно участвуют в их формировании. Рассмотренные тенденции подтверждают необходимость дальнейшего изучения влияния цифровой среды на ценностные установки и общественное сознание в контексте развития российского общества.

Список используемых источников

1. Аудитория пользователей интернета, социальных сетей, мессенджеров и VPN-сервисов. // Левада-центр URL: https://www.levada.ru/2024/04/23/auditoriya-polzovatelej-interneta-sotsialnyh-setej-messendzherov-i-vpn-servisov/ (дата обращения: 20.02.2026).
2. Социальные сети и мессенджеры: вовлеченность и предпочтения // ВЦИОМ. URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/socialnye-seti-i-messendzhery-vovlechennost-i-predpochtenija (дата обращения: 02.02.2026).
3. Роскомнадзор начал ограничение работы Telegram в феврале 2026 г. с целью приведения сервиса к соответствию законодательству РФ // РБК. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/10/02/2026/698afe729a79470c08a17b9 (дата обращения: 02.02.2026).
4. Роскомнадзор подтвердил введение ограничений против Telegram и других мессенджеров за нарушения российского законодательства // «Новая газета». URL: https://novayagazeta.ru/articles/2026/02/10/roskomnadzor-podtverdil-ogranicheniia-raboty-telegram-v-rossii-news (дата обращения: 02.02.2026).
5. Ограничения работы Telegram и WhatsApp в России приведены к частичной блокировке голосовых функций, что отражает позицию регулятора // РБК. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/22/10/2025/68f8b4189a7947275ce113be (дата обращения: 02.02.2026).
6. Платформенная занятость: между гибкостью и неформальностью // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ). URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1103679146.pdf (дата обращения: 02.02.2026).
7. Стребков Д. О., Шевчук А. В. Электронная самозанятость в России // Вопросы экономики. 2011. № 10. URL: https://publications.hse.ru/pubs/share/folder/vm5l7weffn/67804148.pdf (дата обращения: 02.02.2026).
8. Использование населением информационных технологий и информационно-телекоммуникационных сетей // Федеральная служба государственной статистики (Росстат). URL: https://rosstat.gov.ru/opendata/7708234640-IKT2024v01 (дата обращения: 02.02.2026).

SOCIAL NETWORKS AS A FACTOR IN THE TRANSFORMATION OF VALUES OF RUSSIAN SOCIETY IN THE 21ST CENTURY

Geht A., Potaenkova K.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines the impact of social networks on the transformation of value orientations of Russian society in the 21st century. The study analyzes changes in the role of social networks in the processes of socialization, the formation of ideas about success and labor, as well as the transformation of attitudes toward the publicity of private life. Based on data from sociological studies and official statistics, the article demonstrates that social networks are becoming a significant factor in the transformation of public consciousness and everyday life.

Key words: values, Russian society, social networks, digitalization, socialization, labor

УДК 502.11. (004)
ГРНТИ 87.33.35

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК В ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ

К. Б. Греков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Проведен анализ возможности использования технологии цифрового двойника в рамках обновления и создания базы данных нового поколения природных объектов (экосистем), включая недра, водные объекты, леса, объекты животного мира и среду их обитания в соответствии со стратегическим направлением в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования. Определены проблемы «цифровой трансформации» отрасли, среди которых следует выделить как организационно-технические, так и носящие структурный, системный характер. Рассмотрены требования к модели данных цифрового двойника.

цифровой двойник, экология и природопользование, цифровая трансформация

Распоряжением Правительства РФ от 15.12.2023 № 3664-р были утверждены стратегические направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования. Основой для внедрения проектов стратегического направления должны стать такие технологии как искусственный интеллект, технологии работы с большими данными, системы распределенного реестра, облачные технологии, технологии дистанционного зондирования Земли и беспилотных летательных аппаратов и интернета вещей. Особо следует отметить технологию цифрового двойника, которую планируется применить «в рамках обновления и создания базы данных нового поколения природных объектов (экосистем), включая недра, водные объекты, леса, объекты животного мира и среду их обитания» [1].

Хотя сам термин «цифровой двойник» появился уже в XXI веке, но появлению этой технологии еще в 1960-е гг. предшествовала разработка систем автоматического проектирования CAD и CAE. В 1970-е гг. после аварии на космическом корабле «Апполон-13» инженеры NASA стали дополнять использующуюся тогда физическую модель космического корабля некоторыми цифровыми компонентами, что можно рассматривать как некий прообраз цифрового двойника. Позже, уже в 1991 г. увидела свет

научно-популярная книга «Зеркальные миры» Д. Гелентера, сотрудника Йельского университета, в которой впервые была представлена концепция, основанная на применении компьютерных моделей, фактически виртуальных копий объектов из реального мира. Модели, по Гелентеру, могут не только отслеживать изменения в самых различных сферах, но осуществлять прогнозирование [2, 3].

Как отмечено выше, собственно термин «цифровой двойник» появился гораздо позже, а его автор – М. Гривз из Мичиганского университета, который сформулировал его как «набор информационных структур, моделирующих предполагаемый или реальный физический объект». Он также отмечал, что цифровой двойник «содержит три основные части: физический продукт в реальном пространстве, виртуальный продукт в виртуальном пространстве и данные и информацию, которые объединяют виртуальный и физический продукт» [4].

Конечно, сейчас в литературе можно найти и другие определения. Так, компания *IBM* определяет цифровой двойник как «виртуальную модель системы, построенную на основе реальных данных, которая может использовать системы ИИ для принятия решений».

В настоящее время цифровые двойники находят применение в самых различных областях: от промышленности до медицины и от управления городами до климатических прогнозов. Последняя задача решалась, например, на Суперкомпьютерного центра Барселоны (BSC) еще в 2004 году, однако требовала очень значительных мощностей.

Что же касается промышленности, то можно отметить цифровые двойники авиадвигателей для контроля их изготовления и эксплуатации, цифровые двойники для производства или для решения задач оптимизации технологических процессов, цифровые двойники целых месторождений, обеспечивающие оптимизацию нефтедобычи и другие примеры. Однако, в полном объеме преимущество цифровых двойников может реализовано лишь при проектировании новых производств. Для уже существующих предприятий рациональнее использовать упрощенный вид цифрового двойника – цифровые тени. Это вариант двойника, адаптированный к сегодняшним потребностям: он ограничен в инструментах для моделирования в виртуальном пространстве и ориентирован на корректную трансляцию данных от физического прототипа к его виртуальному прообразу [5].

Интересно, что модели, разработанные для решения технических инженерных задач, находят успешное применение в медицине. Так, программ-

ное обеспечение, разработанное для проектирования самолетов, было использовано для лечения пациента с увеличенным правым предсердием. Модель, позволяющая устранить повреждения крыла самолета, была применена для разработки манжеты для искусственного клапана сердца. Эти примеры показывают, что модели, разработанные для решения задач в одной области, успешно применяются и в других сферах. Это может быть полезно и для разработки цифровых двойников в отрасли «Экология и природопользование».

Применение технологии цифрового двойника в экологии и природопользовании в перспективе позволит повысить эффективность контрольно-надзорных мероприятий, благодаря возможности быстро выявлять виновников негативного воздействия на окружающую среду. Эта технология даст возможность оценить экологическую обстановку в режиме реального времени или по крайней мере, близком к реальному времени. Кроме этого, возможно снижение затрат на организацию мониторинговых наблюдений за счет оптимизации сети постов и автоматизации анализа данных, а самое главное – появится возможность прогнозировать негативные изменения в экосистемах в результате тех или иных неблагоприятных внешних воздействиях.

Для создания цифрового двойника в экологии и природопользовании используются такие технологии как базы данных (геоданные, данные датчиков, сведения о состоянии объекта и др.), геоинформационные системы (ГИС), модель объекта, содержащую информацию о его структуре, функциональности и характеристиках и построенную на основе метода фотограмметрии. При создании цифрового двойника применяется также лидарная съемка, позволяющая создать цифровую 3D-модель объекта с высокой степенью детализации.

В настоящее время Федеральное агентство Лесного хозяйства разработало Федеральную государственную информационную систему лесного комплекса, которая объединила данные о количественных и качественных характеристиках леса, позволяя отслеживать его состояние, объемы вырубок и восстановления. Цель Рослесхоза – создать цифровой двойник леса, чтобы все лесохозяйственные мероприятия отражались в системе фактически в реальном времени, а участники лесных отношений понимали текущее состояние лесных ресурсов.

Созданием цифрового двойника в этой области занимаются не только федеральные структуры, но и крупные предприятия. Так, Пермская целлю-

лозно-бумажная компания разработала собственную технологию цифрового двойника леса, что позволило обнаружить в регионе более 40 % неучтенного государством леса только за три года.

Созданием цифровых моделей объектов размещения твердых коммунальных отходов (ТКО) с 2022 года занимается Российский экологический оператор, разработавший уже около 1000 таких цифровых двойников, позволяющих оценить текущее состояние полигонов и определить оставшийся период их эксплуатации. При этом контролируются такие параметры объектов размещения ТКО, как площадь, объем, высота, а также участки, выходящие за пределы отведенной территории, случаи обрушения откосов и распространения фильтрата за границы объекта.

В Санкт-Петербурге разработана трехмерная модель геологического строения подземного пространства, которая обеспечивает визуализацию геологических разрезов и блок-диаграмм на любой линии или площади, заданной на поверхности.

В литературе появляется все больше примеров разработки цифровых двойников на региональном уровне или для отдельных объектов в области экологии и природопользования [6-10]. По мнению авторов работы [10], дорожная карта создания цифрового двойника в экологии и природопользовании должна включать следующие этапы: формализация целей исследования – сбор и обработка данных – разработка концептуальной модели – математическое моделирование – валидация модели цифрового двойника – калибровка модели – анализ чувствительности – использование модели цифрового двойника. При этом валидация является наиболее критическим этапом, обеспечивающим достоверность результатов. Сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений и экспертными оценками необходимо для верификации и калибровки модели.

Проведенный анализ показывает, что среди проблем «цифровой трансформации» отрасли «Экология и природопользование» следует выделять как организационно-технические, так и носящие структурный, системный характер. При этом особое внимание необходимо обратить на отсутствие взаимодействия информационных систем органов исполнительной власти; недостаточный уровень достоверности, актуальности и полноты статистической информации в области экологии и природопользования. Важнейшей задачей является также разработка отраслевого регулирования области применения технологии цифрового двойника.

Список используемых источников

1. Распоряжение Правительства РФ от 15.12.2023 N 3664-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования, относящейся к сфере деятельности Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации» URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408171423/?ysclid=mm3aqxn4ao895757937 (дата обращения: 25.02.2026).

2. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept. Florida Institute of Technology, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (дата обращения: 25.02.2026).

3. История и новые кейсы цифровых двойников: от космоса до интеграции с ML. – URL: https://habr.com/ru/companies/mws/articles/837900/?ysclid=mly2y55l41384651170 (дата обращения: 25.02.2026).

4. Гривз М. Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 306223791_ Digital_Twin_Mitigating_Unpredictable_Undesirable_Emergent_Behavior_in_Complex_Systems (дата обращения: 25.02.2026).

5. Bauerenhansl T., Hartlife S., Felix T. The Digital Shadow of production – A concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments. Procedia CIRP, Stuttgart, Germany, 2018. URL: https://www.sci-hub.ru/ 10.1016/j.procir.2018.03.188?ysclid=mm3b1wf6y8129981965 (дата обращения: 25.02.2026).

6. Валиев В .С., Иванов Д. В., Шамаев Д. Е., Хасанов Р. Р. Создание «цифровых двойников» в рамках цифровой трансформации экологического мониторинга // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 3. С. 29–33.

7. Вязилов Е. Д., Мельников Д. А., Минков О. А. Об использовании данных цифровых двойников в моделях, связанных с учетом воздействия окружающей среды на предприятия // Автоматика и телемеханика. 2024. Вып. 3. С. 60–72.

8. Анахов С. В. Цифровые технологии в экологической практике. URL: https://elar.uspu.ru/ bitstream/ru-uspu/40900/1/978-5-9907908-1-0_2022_007.pdf (дата обращения: 25.02.2026).

9. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Применение цифровых двойников в управлении природопользованием на примере побережья Калининградской области // Морские исследования и образование (MARESEDU-2023): материалы XII Международной научно-практической конференции Москва, 23–27 окт. 2023 г. М.: 2024. т. I (IV).С. 498-505.

10. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. № 1. С. 40–57.

DIGITAL TWIN IN ECOLOGY AND NATURE MANAGEMENT

Grekov K.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

An analysis was conducted of the feasibility of using digital twin technology to update and create a new-generation database of natural objects (ecosystems), including subsoil, water bodies, forests, wildlife, and their habitats, in line with the strategic direction of digital transformation in the ecology and nature management sector. The challenges of digital transformation in the sector were identified, including both organizational and technical challenges, as well as structural and systemic ones. Requirements for the digital twin data model were examined

Key words: digital twin, ecology and environmental management, digital transformation

УДК 364.12
ГРНТИ 06.54.31

ИНТЕГРАЦИЯ AI-ПРОДУКТОВ В «СЕРЕБРЯНУЮ» ЭКОНОМИКУ

М. А. Егорова, В. С. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Одним из трендов современной демографии является устойчивое старение населения. Стремительное развитие искусственного интеллекта открывает уникальные возможности для решения специфических вызовов, связанных с демографической трансформацией. В статье проанализирован процесс интеграции искусственного интеллекта в сегмент «серебряной экономики». Изучены потребности старшего поколения, существующие на рынке продукты с использованием искусственного интеллекта и их функционал. Выявлены барьеры и риски входа на рынок.

старение населения, серебряная экономика, AI-продукты

В настоящее время происходит демографическая трансформация, связанная со старением населения. Такая тенденция затрагивает не только вопросы социального обеспечения, но и ставит актуальную задачу формирования рынка, ориентированного на потребности людей старшего возраста, поиск и создания инновационных инструментов для обеспечения их активного долголетия, здоровья, безопасности и участия в жизни общества.

Положительным моментом является то, что россияне стали жить дольше. На сегодня численность населения нашей страны старше 60 лет (серебряный возраст) составляет около 35 млн человек, и, по прогнозу Росстата, тренд на демографическое старение продолжится. К 2030 году ожидается, что доля жителей старше 60 лет будет 25,4 % (каждый четвертый житель), а через 20 лет к 2050 году их доля увеличится до 30,4 % [1].

Формирование и интеграция AI-продуктов в «серебряную» экономику» открывают огромные возможности для формирования нового потребительского сегмента. Постепенно происходит позитивное изменение восприятия пожилого возраста – как новый этап жизни для самореализации и социальной активности [2]. Именно в этом заключается основной потенциал для внедрения высокотехнологических решений, призванных не просто компенсировать возрастные ограничения, но и расширять возможности человека в позднем возрасте. Все эти факторы определяют необходимость

интеграции AI-продуктов в жизнь пожилых людей с целью улучшения качества их жизни и обеспечения активного долголетия.

Согласно данным научных исследований, основными потребностями сегмента «серебряной» экономики являются здравоохранение, социальная активность и коммуникация, безопасность, возможность самостоятельного проживания, а также досуг и когнитивное здоровье [3].

В здравоохранении помимо лечения, важны регулярный мониторинг состояния людей старшего поколения, возможность удаленных консультаций, оказание в случае необходимости экстренной помощи. AI-продукты сферы здравоохранения для «серебряной» экономики включают большое разнообразие систем: умные устройства, телемедицина и интеллектуальные фармацевтические сервисы. Современные версии умных носимых устройств (например, смарт-часы здоровья) позволяют их владельцам не только быстро отслеживать показатели давления, пульса, уровня кислорода в крови, но и проводить анализ данных, используя сложные ИИ алгоритмы. Например, монитор здоровья Hwatime позволяет вести круглосуточное наблюдение за пожилыми людьми [4].

Телемедицина действует как экосистема комплексного поддержания здоровья за счет удаленных консультаций врачей, персонального управления приемом лекарств, проверку взаимодействия препаратов и их автоматическое пополнение, позволяя пожилым людям сохранять возможность оставаться самостоятельными в привычной домашней обстановке.

Следующее направление использования современных технологий для «серебряной» экономики связано с необходимостью в постоянной социальной активности и коммуникации людей старшего поколения. Здесь уже применяются роботы-компаньоны, инициирующие коммуникацию с целью борьбы с одиночеством; виртуальные голосовые помощники, встроенные в устройства и упрощающие процесс звонков и видео-звонков, платформы для хобби и когнитивной стимуляции, поддерживающие умственную активность, технологии виртуальной реальности, позволяющие посещение виртуальных пространств и мероприятий.

Удачный пример использования искусственного интеллекта для борьбы с одиночеством и поддержки базовых потребностей старшего поколения – японский социально-эмоциональный робот Tapia. Благодаря встроенному интеллекту робот-ассистент способен к обучению: распознает голоса и лица, определяет эмоциональное состояние по тону голоса, запоминает имена и важные даты. Функционал робота позволяет предоставлять

информацию о погоде, воспроизводить музыку, читать новости, делать телефонные звонки и онлайн-заказы, развлекать шутками, рассказывать истории. Встроенная камера позволяет следить за безопасностью в доме [5].

Отечественные разработки – интеллектуальные колонки со встроенным голосовым помощником – Алиса, Салют или Маруся умеют поддерживать беседу, шутить, адаптируя стиль общения, что делает взаимодействие более живым. Функционал систем позволяет управлять расписанием, устанавливать будильник, сообщать прогноз погоды и зачитывать последние новости, воспроизводить музыку и аудиокниги.

Платформы Сбербанка, Яндекса и ВКонтакте с системой «умный дом» позволяют создать цифрового компаньона с возможностями основных функций робота-ассистента – от управления освещением, розетками и климатическими технологиями до эмоционального общения. С помощью камеры smart speaker или подключенных устройств система способна удаленно видеть обстановку в доме, а датчики движения позволяют отслеживать активность пожилых родственников и отправлять уведомления в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Центр робототехники Сбера продолжает работать над доработкой умных роботов-помощников общего назначения (Краб и Слон) для более сложного взаимодействия с пользователем, включая манипулирование физическими объектами. Уникальная AI-начинка роботов сможет адаптироваться к разным задачам и взаимодействовать с людьми на интуитивном уровне [6].

Несмотря на возможности и значительный потенциал, процесс интеграции AI-продуктов сопровождается рядом трудностей: цифровой разрыв, низкая технологическая грамотность населения, недоверие и боязнь нового, риски, связанные с сохранением конфиденциальности данных. К вызовам также относятся растущая нагрузка на системы пенсионного обеспечения и здравоохранения, риск социальной изоляции пожилых людей в условиях цифровизации, а также необходимость адаптации инфраструктуры и сервисов под нужды стареющего населения.

Одним из технологических барьеров интеграции AI-продуктов в сегмент «серебряной» экономики является отсутствие адаптивности пользовательских интерфейсов. Так, на сегодня многие системы и приложения не учитывают возрастные изменения пользователей, поэтому интерфейсы часто визуально сложны, текст слишком мелкий, а быстро меняющиеся элементы сильно затрудняют восприятие для пожилых людей [2]. Та же проблема касается голосовых помощников – они часто демонстрируют низкую

эффективность при распознавании речи с возрастными особенностями дикции. Проблемы интеграции устройств создают дополнительные сложности в освоении систем, так как многие имеют совершенно разные алгоритмы действий и работы, в связи с чем гибкие экосистемы являются наиболее востребованными вариантами.

Большинству AI-продуктов для стабильной работы нужно высокоскоростное интернет-соединение и это создает технологический риск, так как ограничение времени автономной работы устройств может привести к несвоевременному реагированию на чрезвычайные ситуации.

Существует и социальные барьеры – цифровая неграмотность и стресс перед новыми технологиями старшего поколения пользователей. Им часто трудно освоить даже базовый функционал устройств, а сложные интерфейсы вызывают страх ошибки и чувство подавленности от обилия функций. Техностресс приводит к быстрой утомляемости при взаимодействии с цифровыми устройствами и блокируют мотивацию к дальнейшему обучению. Опасения по поводу сокращения человеческого общения также являются препятствиями, замедляющими адаптацию к новым технологиям. Старшее поколение, привыкшее к живому общению, может негативно воспринимать его замену алгоритмами.

Особенно актуальны этические вопросы защиты личной информации и безопасности в связи с решениями на основе искусственного интеллекта. Устройства для отслеживания здоровья, умные дома и трекеры собирают информацию о повседневной жизни человека, его физическом состоянии и привычках. Неудивительно, что возникает вопрос о том, кто имеет доступ к этим данным и как они могут быть использованы.

С экономической точки зрения препятствиями разработки и внедрения устройств для пожилых людей на базе искусственного интеллекта являются: высокая стоимость умных устройств, недоступная для многих пенсионеров (цена робота Tapia около 1500$ [6]); отсутствие надежных бизнес-моделей и четких схем получения прибыли, затрудняющих привлечение инвестиций в эту сферу; недостаточное государственное финансирование и отсутствие программ субсидирования конечных пользователей; неопределенность окупаемости инвестиций в разработку специализированных продуктов для узкой целевой аудитории.

На сегодня нет четкого регулирования, и специализированных процедур сертификации продуктов на основе искусственного интеллекта в геронтологии. Отсутствие стандартов качества и безопасности ведет к правовой

неопределенности ответственности за решения, принимаемые программами в критических ситуациях, создает дополнительные риски и задерживает их выход на рынок. Право на неприкосновенность частной жизни при использовании систем непрерывного мониторинга требует разработки специальных этических правил. При этом чрезмерный контроль со стороны технологий ограничивает свободу выбора пожилого человека и создает организационные проблемы, связанные с обменом информацией между медицинскими, социальными и технологическими службами. Консервативный подход государственных структур к принятию инновационных решений и длительные сроки утверждения новых технологий также замедляют процесс интеграции ИИ.

Проведенное нами исследование подтвердило, что внедрение продуктов, основанных на ИИ, очень важно для «серебряной» экономики, ориентированной на пожилых людей. Опрос потребителей данного сегмента показал, что большинство пользователей хорошо осведомлены о существующих голосовых помощниках (47 %), 26 % уже используют их в повседневной жизни, 21 % опрошенных только слышали о них, но не знают, что это такое, а 5 % вообще не знакомы с этой технологией. На восприятие голосового управления большая часть респондентов отреагировала положительно (60 %), но 32 % опрошенных высказали сомнения из-за возможных трудностей в освоении.

В ходе опроса выделено несколько ключевых барьеров, сдерживающих более широкое внедрение голосовых помощников: высокая стоимость устройства (26 %), сложность в освоении (26 %), безопасность данных (21 %). 15 % респондентов заявили, что такая технология им просто не нужна. Необходимыми функциями голосовых помощников респонденты назвали: определение погоды (18 %), включение музыки или радио (17 %), чтение книг или новостей (15 %), звонки родственникам (13 %), вопросы о лекарствах и здоровье (13 %), установка будильника или напоминания (12 %). Отмечен высокий уровень спроса на помощника для вызова экстренной помощи. Опрошенные назвали факторы, которые их беспокоят, – ухудшение состояния здоровья, изменения в привычном образе жизни, социальную изоляцию и одиночество из-за потери близких. Исследование подтвердило существующие возрастные стереотипы, недоверие к технологиям. Эти опасения отражаются на том, как респонденты осваивают новые технологии: – 95 % не могут самостоятельно освоить AI-продукты, а полагаются на помощь детей или внуков.

Внедрение ИИ в «серебряную» экономику в широких масштабах затрудняют сложность адаптации интерфейсов и интеграции, низкая цифровая грамотность, стресс от использования технологий, недоверие, высокая стоимость и не всегда очевидная прибыльность, отсутствие стандартов и правил. Для преодоления этих трудностей необходимы совместные усилия правительства, технологических компаний и общества. Важно разработать образовательные программы для повышения цифровой грамотности пожилых людей, создать стимулы для производителей и потребителей, а также создать четкую нормативно-правовую базу, регулирующую использование искусственного интеллекта в сфере ухода за пожилыми людьми. Необходимо создавать не просто технологические продукты, а доступные, этичные, надежные и персонализированные решения, для улучшения качества жизни пожилых людей.

Список используемых источников

1. Демографический ежегодник России. 2023: Статистический сборник / Росстат. М., 2023. – 256 с. // https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Demogr_ejegod_2023.pdf.

2. Дудченко О. Н., Мытиль А. В. Пожилой человек в цифровом мире (по результатам эмпирических исследований) // Россия реформирующаяся. 2020. С.33-356.

3. Колесник А. П. Актуальная классификация потребностей российских пенсионеров // Стратегии бизнеса. 2021. Том 9. № 3. С. 74 – 83.

4. Запущен круглосуточный домашний монитор здоровья для поддержки пожилых людей и пациентов, находящихся на реабилитации // Hwatime Medical. URL: https://www.hwatimemedical.com/ru/news/24-7-home-health-monitor-launched-to-support-elderly-and-recovery-patients/ (дата обращения: 25.12.2025).

5. Робот-ассистент Tapia // Goodsi. URL: https://goodsi.ru/robot-assistent-tapia/ (дата обращения: 17.01.2026).

6. Сбер представил семейство роботов-аниматроников Топу и Кубу, а также роботов-помощников Краба и Слона / Хабр // https://habr.com/ru/news/865830/.

INTEGRATION OF AI PRODUCTS INTO THE SILVER ECONOMY

Egorova M., Smirnova V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

One of the trends in modern demography is the steady aging of the population. The rapid development of artificial intelligence opens up unique opportunities for solving specific challenges related to demographic transformation. This article analyzes the process of integrating artificial intelligence into the «silver economy» segment. It examines the needs of the older generation, existing products on the market that use artificial intelligence, and their functionality. The article also identifies barriers and risks associated with entering the market.

Key words: aging population, silver economy, AI products

УДК 316.422
ГРНТИ 04.21.21

ПОСТИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЩЕСТВО: МИФ ИЛИ НОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ?

А. Ю. Завалишин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассмотрена возможность преобразования информационного общества в постинформационное. Показаны терминологические противоречия, связанные с обозначением современного общества как «постинформационного». Приведены отличия постинформационного общества от предшествующих типов обществ. Обозначены проблемы и противоречия, связанные с трудностями экспликации общества на стадии перехода от информационного к постинформационному.

информация, коммуникация, информационное общество, постинформационное общество, информационный шум, искусственный интеллект, big data

Раньше люди пользовались интернетом,
теперь Интернет пользуется людьми.

Интернет-мем

Стремление людей (и не только ученых) идентифицировать общество, в котором они живут, возникло еще на заре человеческой цивилизации. Как очевидно, необходимость понимать сущность той социальной / политической / экономической системы, в которой существует индивид, заложено в человеческой природе и имеет не только познавательный, но и прагматический смысл, позволяет более успешно интегрироваться в социальную среду, выстраивать жизненную траекторию в соответствии с ее спецификой.

На протяжении столетий, а особенно начиная с возникновения социальных наук во второй половине XIX века, потребность в типологизации обществ лишь усиливалась. Первоначально все выглядело логично и терминологически корректно. Историки выделили и описали Античное, Средневековое и Новое (то есть, «нынешнее» им) время; экономисты марксистского толка – первобытное, рабовладельческое, феодальное, капиталистическое и (гипотетически) коммунистическое; социологи, в зависимости от базового принципа типологизации, – общества собирателей, охотников, огород-

ников, аграриев и промышленников, аграрное, индустриальное и информационное, Gemeinschaft и Gesellschaft; политологи – тоталитарное, авторитарное и демократическое; культурологи – традиционное общество и общество модерна (в значении «современное»). Все эти (и многие другие) типологии объединяло то, что использовавшиеся в них понятия, при всей их содержательной широте, в значительной степени соответствовали обозначаемому ими элементу социальной реальности.

А дальше что-то пошло не так. В XX, а еще более – XXI веке научная рефлексия стала все более отставать от социальной динамики: перемены, происходившие (и происходящие) в обществе, были более, чем очевидны, а понятия, которые бы в содержательном и этимологическом смысле им соответствовали, подобрать из существующего научного лексикона оказалось невозможно. И вот тогда историки «придумали» Новейшее время (возможно, в обозримом будущем можно ожидать появление термина «Наиновейшее» или чего-то подобного), а социологи / политологи / культурологи к месту и не к месту стали использовать приставку «пост-» в значении «после»: постиндустриальное общество, общество постмодерна (а с некоторого времени – постпостмодерна, за чем, видимо, последует – постпостпостмодерн), постсоветское общество, общество постправды и т. д., и т. п. К этому же ряду принадлежит и общество постинформационное.

Нельзя не признать, что обоснованные претензии к «постсловотворчеству» предъявляются постоянно (см., напр. [1]), но принципиального решения этой терминологической проблемы нет, преимущественно, по двум причинам: во-первых, потому что приставка «пост-» настолько всеобъемлюще бессодержательна, что ее можно наполнить любым смыслом в зависимости от желания исследователя; во-вторых, потому что все многочисленные попытки замены «пост-» на что-то более предметное и признанное научным сообществом, неизменно закачиваются неудачей.

В качестве иллюстрации данной проблемы можно привести пример замены предиката «постинформационное» таким, который характеризовал бы данный тип общества более предметно: «кибернетическое общество», «общество (не-)знания», «сетевое общество», «цифровое общество», «smart-общество», «мобильное общество», «платформенное общество», «неоинформационное общество» и даже «вездесущее общество» [2, 3], однако, всеобщего научного признания ни один из названных терминов так и не получил.

При этом проблема с экспликацией «постобществ» состоит не только в отсутствии подходящих терминов, но и в том, что по мере эволюции

и усложнения общественных отношений однозначное их определение становится все менее возможным. Как справедливо отмечает А. И. Ракитов, «хотя “синих воротничков” становится все меньше в сравнении с количеством служащих, занятых в сфере услуг и управления, подавляющее большинство материальных благ и процессов, поддерживающих нашу жизнедеятельность, является продукцией индустриального производства» [4, с. 12]. Действительно, общество, которое характеризуется как «постинформационное», представлено далеко не только «цифрой», Интернетом и сферой услуг, но и развитым индустриальным сектором, эффективной агрокультурой, да и собиратели-огородники-рыбаки-охотники никуда не делись. В этом смысле современное общество можно представить в виде своего рода «матрешки», в которой в измененном виде присутствуют все предшествующие типы обществ, как бы «вложенные» друг в друга.

Обоснованная претензия к обозначению типа общества как «информационного» / «постинформационного» связана еще и с тем, что общество, с точки зрения социологии, само по себе является не материальным объектом (совокупностью взаимодействующих индивидов), а идеальным субъектом, основу которого составляют информация и коммуникация [5]. В этом смысле не только современное, но и первобытное общество информационные по своей сути, потому что без информации и ее обмена между людьми никакое общество не может существовать.

И все-таки «постинформационное». При всех претензиях к термину, пожалуй, он остается самым популярным, возможно, благодаря скрытому в нем противоречию: «постинформация» буквально читается как мир «после» / «без» информации, в то время как в реальности информация и информационные потоки все более определяют современное человеческое бытие.

Попытки эксплицировать постинформационное общество, преимущественно, противопоставляя его информационному, предпринимались, по меньшей мере, с 1990-х годов, когда феномен «постинформационности» был еще уделом ученых-футурологов и писателей-фантастов. За прошедшие десятилетия их отличия из гипотетических превратились в социальную реальность, причем, ключевую роль в этом сыграли два обстоятельства: начавшаяся в конце 2019 г. пандемия COVID-19 и взрывное использование искусственного интеллекта в 2022. Перечень их отличий постоянно пополняется – социальная динамика лишь ускоряется (см. напр. [6]).

К настоящему времени среди наиболее значимых отличий / особенностей постинформационного общества можно назвать следующие.

1. Изменение социальной значимости информации. Как отмечалось выше, общество – это идеальный субъект, состоящий из информации и коммуникации. В конце XX века французский философ Ж. Деррида высказал аналогичную мысль в известном тезисе: «Все есть текст» [7]. Кратко суть этого утверждения состоит в том, что социальная реальность воспринимается и осмысливается людьми не с помощью органов чувств, как у животных, а в виде информации – через язык и знаки, систему смыслов, которые Ж. Деррида трактует как текст в широком смысле этого слова. Если физический мир материален и дан нам в ощущениях, то социальный мир (общество) идеален и в этом смысле он познается и определяется через текст и именно как текст: меняется текст – меняется образ (картина) мира. Информация – это текст, система знаков. Если в информационном обществе текст является носителем знания, отражением (не всегда непосредственным) объективной (хотя бы в кантианском смысле) реальности и поэтому имеет практическую значимость, то в обществе пост-информационном текст это свойство утрачивает – во все более возрастающем потоке информации (big dada) практически значимые сведения тонут в море информационного шума (как в известной сказке «Золотая антилопа» – золото превращается в черепки).

2. Возрастающие ограничения в доступе к информации, по сути, означающие тенденцию к возвращению в «доинформационную» эпоху. После непродолжительного периода общедоступности практически любой информации благодаря появлению интернета, властные органы начинают все более интенсивно «защищать» общество / государство от «нежелательного» контента, который, по мнению политиков и экспертов несет угрозу национальной безопасности и общественной морали. Причем, это касается не только стран с авторитарными и тоталитарными режимами, но и демократических, то есть, носит всеобщий характер. Вследствие этого недоступной для пользователей зачастую делается и информация, не имеющая никакой реальной или потенциальной опасности. Борьба с нежелательным / противоправным контентом все более сужает информационное пространство и, действительно, в перспективе может породить постинформационное общество, «защищенное» от любой информации, сделав ее доступной лишь для узкого круга доверенных лиц.

3. В постинформационном обществе ведущая роль в получении и использовании информации, а также генерировании новой информации переходит от человека к искусственному интеллекту, что в перспективе может

привести к тому, что люди окажутся вытеснены за пределы информационного поля как избыточный элемент. Выглядит фантастично, но уже сегодня существуют компьютерные программы, которые способны без участия человека формулировать новые исследовательские задачи, самостоятельно их решать и выдавать готовый результат. На фоне взрывного роста эффективности программ с искусственным интеллектом и использования роботов во всех сферах человеческой деятельности утверждение И. Маска: «Меньше, чем через 20 лет работа станет необязательной. Вообще работать будет необязательно. Как хобби», – уже не выглядит фигурой речи.

4. Значительное превышение доли недостоверной информации над достоверной и как следствие – тотальное недоверие людей к любой информации.

5. Предоставление таргетированной информации, когда потребитель, благодаря специальным программам, заложенным в браузерах, получает в свою информационную ленту преимущественно те сообщения, к которым продемонстрировал интерес, вследствие чего формируется искаженный образ реальности – убежденность в том, что все обстоит именно так, как сообщается в специально для него подобранных данных. Это в равной мере касается и политики, и экономики, и культуры. Человек оказывается в своего рода «информационном пузыре», скрывающем от него альтернативный взгляд на реальность.

6. Отказ (часто вынужденный) от критического восприятия и анализа информации, которую за людей делают программы / роботы, выдавая конечный результат, релевантность которого невозможно или крайне трудно оценить с учетом ограниченности человеческого мышления.

7. Обесценивание интеллектуального / творческого труда человека, замена «живого» человеческого творчества «не-человеческим» (ИИ) (мем из интернета, как крик о помощи: «Прежде чем умиляться на фото котика, я хочу знать – это реальное изображение или сгенерированное ИИ?»). Как следствие – отчаянные, но, скорее всего, безрезультатные попытки деятелей искусства и науки (художников, музыкантов, ученых и т.п.) сохранить эксклюзивное право на творчество, ввести запрет на использование ИИ для создания произведений искусства, научных трудов.

8. Возрастающая зависимость людей, их безопасности от интернета и искусственного интеллекта, возникновение угроз, связанных с перебоями в деятельности сети или сбоями в работе компьютерных программ. Люди становятся рабами постинформационного общества, но это «сладкое» раб-

ство – оно освобождает нас от мук выбора, и отказаться от него становится все труднее.

Перефразируя известное высказывание Р. Декарта – «Я мыслю, следовательно, существую», в отношении постинформационного общества можно сказать: «Я существую, пока оцифрован».

Список используемых источников

1. Вохлачев С. В. Приставка «пост» уже никого не радует // Независимая газета. 27 мая 2019.

2. Ефанов А. А., Музыкант В. Л. Трансформация социальной структуры в неоинформационном обществе // Вестник РУДН. Серия: Социология. 2025. Том 25. № 3. С. 762–779.

3. Белова Л. Г. Концепция «вездесущего общества» и государственные программы формирования информационного и постинформационного общества в Японии // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2014. № 5. С. 43–60.

4. Ракитов А. И. Постинформационное общество // Философские науки. 2016. № 12. С. 7–19.

5. Хабермас Ю. Моральное сознание и коммуникативное действие. СПб.: Наука, 2006. 384 с. ISBN: 5-02-026926-3.

6. Прохоров-Малясов Г. С. Постинформационное общество – ключевая ступень социальной трансформации. Прогностический аспект // Контекст и рефлексия: философия о мире и человеке. 2022. Том 11. № 6А. С. 137–147.

7. Деррида Ж. О грамматологии / пер. с фр. и вступ. ст. Н. Автономовой. М.: Ad Marginem, 2000. 511 с. ISBN 5-93321-011-0.

POST-INFORMATION SOCIETY: MYTH OR NEW REALITY?

Zavalishin A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the possibility of transformation an information society into a post-information one. It highlights the terminological contradictions associated with labeling modern society as "post-information". The differences between a post-information society and previous types of societies are highlighted. The problems and contradictions associated with the difficulties of defining society during the transition from an information society to a post-information society are outlined.

Key words: information, communication, information society, post-information society, information noise, artificial intelligence, big data

УДК 338.47
ГРНТИ 06.81.45

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ В ЭКОНОМИКУ ДАННЫХ: ОСОБЕННОСТИ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОГО И ОТРАСЛЕВОГО РАЗВИТИЯ В РОССИЙСКОМ ИКТ-СЕКТОРЕ

А. В. Исаков, Е. В. Павлова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена анализу эволюции российской экономической практики в сфере информационно-коммуникационных технологий (далее – ИКТ) в контексте глобального тренда движения от «цифровой экономики» к «экономике данных». Исследуется теоретическая разница между концепциями, где «цифровая экономика» фокусируется на инфраструктуре, услугах и процессах оцифровки, а «экономика данных» – на данных как ключевом факторе производства и отдельном рыночном активе. На основе анализа национальных стратегических документов (госпрограмма «Цифровая экономика Российской Федерации», Стратегия развития информационного общества, Национальная стратегия развития искусственного интеллекта) делается вывод о том, что российский опыт демонстрирует гибридную модель перехода, сочетающую сильную роль государства в формировании инфраструктуры и нормативного поля с активностью крупного корпоративного сектора ИКТ, при этом отмечается отставание в развитии рынка данных и экосистем.

экономика данных, цифровая экономика, ИКТ-отрасль России, регулирование данных, цифровая трансформация, факторы производства, большие данные

Глобальная цифровая трансформация вступила в качественно новую фазу, где центральным экономическим активом становятся не цифровые каналы или сервисы сами по себе, а данные, генерируемые в процессе их использования. Если «цифровая экономика» (Digital economy) концентрировалась на создании инфраструктуры и переводе традиционных процессов в электронную форму, то «экономика данных» (Data Economy) предполагает формирование рынков данных, где информация становится объектом купли-продажи, основой для создания новых продуктов и сервисов, а также критическим ресурсом для принятия решений. Российская Федерация, реализуя масштабную программу цифровизации, также сталкивается с необходимостью этого концептуального и практического сдвига [1, 2]. Отрасль информационно-коммуникационных технологий, являясь одновременно драй-

вером и полигоном для нововведений, представляет собой наглядный пример для изучения данного перехода. Целью данной статьи является анализ специфики, драйверов и барьеров становления экономики данных в России на материале ИКТ-сектора.

Для начала необходимо определить основные аспекты, показывающие различия понятий «цифровая экономика и «экономика данных».

Цифровая экономика традиционно понимается как хозяйственная деятельность, основанная на цифровых технологиях, электронных товарах и услугах [3]. Ее ключевые показатели – уровень проникновения широкополосного интернета, развитие электронной коммерции, уровень использования электронных технологий в различных отраслях и секторах экономики и производства, доля ИКТ-сектора в ВВП.

Экономика данных – это следующая этап развития экономики, где информационные данные выделяются в отдельный фактор производства наряду с трудом, капиталом и землей. Ядро экономики данных составляют:

– информационные данные, рассматриваемые в качестве актива, то есть возможность оценки, оборота и монетизации массивов данных.
– платформенность и экосистемы: создание сред для безопасного обмена и совместного использования данных между различными субъектами: бизнес-среда, государство, население.
– сквозные технологии: искусственный интеллект (далее – ИИ), интернет вещей (далее – IoT) и большие данные (далее – Big Data) как основные инструменты извлечения ценности из данных.
– новая регуляторная парадигма: баланс между стимулированием свободного обращения данных и защитой прав субъектов персональных данных, обеспечением суверенитета и безопасности.

Российская ИКТ-отрасль являясь ядром цифровой трансформации экономики первой использовала регуляторные инициативы и возможности государственной стратегии для перехода к экономике данных [4]. Если изначальная госпрограмма «Цифровая экономика», стартовавшая в 2017 году, фокусировалась на развитии инфраструктуры для возможности распространения электронных технологий на всей территории Российской Федерации, имеющей огромную протяженность и наличие труднодоступных для жизни и малонаселенных пунктов, а также на кадровом обеспечении данной инфраструктуры, такой как широкополосный доступ, 5G, то актуализация выше обозначенной программы и сопутствующие нормативно-правовые документы, такие как Стратегия развития искусственного интеллекта, кон-

цепция «Data Driven Government» сместили акцент на управление данными в электронном формате [5, 6]. Ключевыми шагами данного перехода стали:

– принятие закона об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций, позволяющих тестировать новые модели работы с данными;
– развитие законодательства об обезличенных данных, создающем юридические основания для их коммерческого и исследовательского использования;
– продвижение идеи суверенного облака и импортозамещения программного обеспечения, что стимулировало развитие внутреннего рынка платформ для обработки и хранения данных (на примере компаний МК ПАО «Яндекс», ПАО «Сбербанк», МК ПАО «ВК», ПАО «Ростелеком»).

Кроме того, активность корпоративного сектора ИКТ обусловила трансформацию крупных российских ИКТ-компаний в центры кристаллизации экономики данных, трансформируясь из сервис-провайдеров в экосистемы и платформы [7].

Во-первых, в качестве примера этой тенденции можно привести платформенные экосистемы ПАО «Сбер», МК ПАО «Яндекс», МК ПАО «ВК», которые интегрируя данные из множественных сервисов, входящих в экосистему: поиск, финансы, еда, такси, медиа, создают уникальные массивы данных о поведении пользователей, которые используются для персонализации, разработки новых сервисов и монетизации через рекламные технологии.

Во-вторых, ИТ-компании начали разрабатывать и предлагать на рынке корпоративные Data-продукты, то есть трансформировать свои компетенции в области анализа данных в коммерческие продукты и B2B-услуги такие как, например, облачные AI-сервисы, аналитические платформы для промышленности [8]. Таким образом, компании отрасли ИКТ становятся поставщиками технологий для экономики данных в других отраслях.

В-третьих, внутри самой ИКТ-отрасли, а также со стороны смежных высокотехнологичных секторов, таких как, например, банковский, сформировался устойчивый спрос на решения, основанные на анализе данных или Data Driven-решения [9]. С помощью данных решений производится оптимизация сетей, ведется борьба с мошенничеством, формируется прогнозная аналитика спроса.

Несмотря на активность компаний отрасли ИКТ в ускорении процессов трансформации цифровой экономики России в экономику данных име-

ются барьеры, существенно тормозящие дальнейшее развитие этого процесса.

Среди них необходимо выделить регуляторные и правовые противоречия. Действующее российское законодательство о персональных данных остается одним из самых строгих в мире [10,11]. Сохранение рисков даже при использовании обезличенных данных, неопределенность в вопросах правового статуса производных данных и результатов анализа создают «правовую серую зону», сдерживающую развитие открытых рынков данных.

Вторым барьером трансформации являются структурные особенности рынка. Доминирование нескольких крупных вертикально интегрированных экосистем ведет к концентрации данных внутри них. Это ограничивает возможность появления независимых игроков, специализирующихся исключительно на сборе, агрегации и очистке данных, что является ключевым элементом зрелой экономики данных.

Третьим барьером на пути формирования экономики данных в России является технологическая зависимость [12,13]. Несмотря на прогресс в импортозамещении, критическая зависимость от иностранного аппаратного обеспечения (чипы, серверы) и части ПО для обработки больших данных создает риски для устойчивого развития технологической базы экономики данных.

Российский опыт перехода к экономике данных в ИКТ-отрасли демонстрирует модель, в которой государство выступает архитектором нормативно-правового поля и заказчиком инфраструктурных проектов, а крупный корпоративный бизнес – основным агентом, формирующим практики работы с данными [14]. Переход от парадигмы «цифровизации процессов» к парадигме «управления данными как активом» является неравномерным и противоречивым. Ключевым достижением можно считать осознание стратегической ценности данных на государственном уровне и формирование мощных корпоративных data-экосистем. Однако для полноценного становления национальной экономики данных необходимы дальнейшие шаги по:

1. Детализации и либерализации законодательства об обороте не персонализированных данных.

2. Стимулированию межкорпоративного и кросс-отраслевого обмена данными, в том числе через создание доверенных посредников и отраслевых data hub.

3. Интенсификации подготовки кадров и исследований в области экономики, права и социологии данных.

Таким образом, российская ИКТ-отрасль находится в активной фазе трансформации, где элементы формирующейся экономики данных накладываются на устоявшиеся структуры цифровой экономики, создавая уникальную гибридную среду для дальнейшего изучения.

Список используемых источников

1. Макаров В. В., Павлова Е. В. Инновационные подходы к приобретению и замещению продукции ИКТ в условиях санкций // Экономика и качество систем связи. 2025. № 3 (37). С. 4-15.

3. Лобанов М. А., Куганов В. Г., Павлова Е. В. Цифровизация российской экономики: положительные и отрицательные тенденции развития // Российская экономика 2024: новые технологии, старые проблемы, прорывные решения: материалы науч.-практ. конф. МАЭФ-2024, Санкт-Петербург, 2024. СПб.: СПбГЭУ, 2024. С. 76-82.

4. Макаров В. В., Павлова Е. В. Влияние экосистем на цифровую трансформацию экономики // Журнал правовых и экономических исследований. 2024. № 2. С. 209-214.

5. Макаров В. В., Павлова Е. В. Развитие цифровых экосистем и их влияние на участников рынка ИКТ // Журнал правовых и экономических исследований. 2024. № 4. С. 289-294.

6. Кулакова Ю. В., Павлова Е. В. Перспективы развития нейросетевых технологий в условиях цифровизации экономики // Экономика и качество систем связи. 2024. № 1 (31). С. 10–17.

7. Павлова Е. В. Факторные ограничения развития бизнес-среды экосистемной направленности в отрасли ИКТ // Экономика и качество систем связи. 2024. № 3 (33). С. 19-27.

8. Павлова Е. В., Свистунов Л. О. Цифровизация экономики как часть процесса индустрии 4.0. // Современный менеджмент: проблемы и перспективы: материалы XVIII нац. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 2023. СПб.: СПбГЭУ, 2023. С. 22–25.

6. Куганов В. Г., Павлова Е. В. Экономические проблемы цифровизации отдельных отраслей и сфер деятельности // Национальные концепции качества: роль качества в научно-технологическом развитии страны: материалы нац. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 2023. СПб.: СПбГЭУ, 2023. С. 263–266.

10. Исаков А. В., Павлова Е. В. Этапы интеграции элементов цифровой экономики в сферу здравоохранения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2023. Т. 4. С. 72–75.

11. Павлова Е. В. Интеграция цифровой экономики в социальные сферы деятельности // Социогуманитарные коммуникации. 2023. № 2 (4). С. 19-23.

12. Лобанов М. А., Куганов В. Г., Павлова Е. В. Повышение качества жизни посредством внедрения цифровых технологий // Качество жизни населения промышленных территорий в стратегии «Общество 5.0»: материалы конф., Казань, 2022. Казань: НИ КФУ, 2022. С. 51–53.

13. Кушнир Л. Д. Особенности и проблемы использования искусственного интеллекта // Студенческая весна – 2022: материалы 76-й Регион. науч.-тех. конф., Санкт-Петербург, 2022. СПб: СПбГУТ, 2022. С. 112–117.

14. Жолобова А. И., Макаров В. В., Павлова Е. В. Информационные технологии в цифровой экономике // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 7 (77). С. 59-62.

15. Жолобова А. И., Макаров В. В., Павлова Е. В. Проблемы развития рынка информационных технологий в условиях пандемии // Евразийское Научное Объединение. 2021. № 10-3 (80). С. 181-184.

TRANSFORMATION OF THE DIGITAL ECONOMY INTO A DATA ECONOMY: FEATURES OF INSTITUTIONAL AND SECTORAL DEVELOPMENT IN THE RUSSIAN ICT SECTOR

Isakov A., Pavlova E.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the analysis of the evolution of Russian economic practice in the field of information and communication technologies (hereinafter – ICT) in the context of the global trend of movement from the «digital economy» to the «data economy». The paper explores the theoretical difference between concepts where the «digital economy» focuses on infrastructure, services, and digitization processes, and the «data economy» focuses on data as a key factor of production and a separate market asset. Based on the analysis of national strategic documents (the state program «Digital Economy of the Russian Federation», the Strategy for the Development of the Information Society, the National Strategy for the Development of Artificial Intelligence), it is concluded that the Russian experience demonstrates a hybrid model of transition combining the strong role of the state in the formation of infrastructure and regulatory framework with the activity of a large corporate ICT sector, while there is a lag in the development of the data market and ecosystems.

Key words: data economy, digital economy, Russian ICT industry, data regulation, digital transformation, factors of production, big data

УДК 330.341
ГРНТИ 06.54.31

ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ КАК ОСНОВА ТРАНСФОРМАЦИИ КОНКУРЕНТНОЙ СРЕДЫ И СУЩЕСТВУЮЩИХ БИЗНЕС-МОДЕЛЕЙ

О. В. Калимуллина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Появление цифровых платформ и бизнес-экосистем привело к трансформации конкурентной среды и возникновению новых бизнес-моделей, поставив сложные задачи перед управленцами и исследователями. Развитие технологий ИИ требует принципиально новых подходов к пониманию и управлению этими сложными системами, где переплетаются технологические, экономические и социальные явления. В этой связи нужен междисциплинарный подход, позволяющий глубоко изучить природу платформ и экосистем, открыть путь к созданию более эффективных и устойчивых бизнес-моделей, способных генерировать ценность для клиентов и всех заинтересованных сторон, а также своевременно выявлять и нивелировать потенциальные риски.

бизнес-экосистемы, цифровые платформы, бизнес-модели, устойчивое развитие

В эпоху цифровой трансформации появление новых инструментов способствует развитию экосистем [1]. Среди таких инструментов выделяются цифровые платформы как мощные средства для создания новых и устойчивых бизнес-моделей [2]. Платформы служат основой для создания бизнес-экосистем благодаря своей уникальной способности трансформировать традиционные линейные цепочки создания ценности в динамичные и многосторонние сети. В отличие от классических бизнес-моделей, ориентированных на контроль ресурсов и прямой обмен «продавец-покупатель», цифровая платформа предоставляет фундаментальную технологическую, коммуникационную и управленческую инфраструктуру, которая облегчает прямое взаимодействие и обмен ценностью между независимыми, разнородными группами участников. Именно эта инфраструктура и задаваемые ею правила игры становятся тем ядром, вокруг которого формируется и растет бизнес- экосистема.

Сложность исследования цифровых платформ и бизнес-экосистем коренится в самой их природе, так как они представляют собой динамичные, многосторонние и саморазвивающиеся системы. Эта сложность носит меж-

дисциплинарный характер и проявляется на нескольких взаимосвязанных уровнях.

С 1990-х годов фирмы начали создавать организационные платформы. Эти внутренние платформы обеспечивали связи между подразделениями внутри фирмы [3]. Благодаря модульной разработке компонентов продукта с заданными свойствами, новые компоненты продукта стали изобретаться и внедряться в коммерческую практику гораздо проще и быстрее. Однако внутренняя продуктовая платформа фирмы была закрыта для внешних фирм. Поставщики, клиенты и третьи стороны, как правило, не имели доступа к этим видам платформ.

Как только фирмы открывали свою товарную платформу для внешних поставщиков, таких как они, и других фирм по цепочке создания стоимости, возникали платформы цепочек поставок. На основе контрактных отношений между участниками цепочки поставок для внешних пользователей выборочно открывались интерфейсы продуктовой платформы. Общепринятым примером являются платформы цепочки поставок для производства самолетов. Например, вместо того, чтобы полностью контролировать поставщиков (т.е. создавать экосистему), Боинг внедрила платформу, которая предоставила необходимые спецификации для поставщиков, что позволило им сохранить автономность некоторых частей инновационного процесса. Основное различие между платформенной экосистемой и платформой цепочки поставок заключается именно в автоматизации. На платформах цепочки поставок операторы платформы имеют контрактные отношения с участниками платформы, не позволяя им свободно взаимодействовать между собой. В то время как в случае платформенной экосистемы партнеры могут свободно выбирать, где и как предоставлять свои предложения.

Третьим и последним типом платформы, которая не создает экосистему (пока), является рыночная платформа-посредник. Рыночные платформы-посредники за последние два десятилетия стали невероятно популярными, поскольку они решают многие проблемы доцифрового периода. Где найти отель? Где забронировать автомобиль? Где встретиться с кем-нибудь для знакомства? По сути, платформа существует всегда и для всего. Общим для всех этих платформ является то, что они работают на многостороннем рынке. Это означает, что на одной стороне рынка есть какое-то предложение (например, проданный автомобиль), которое ожидает другая сторона рынка. По сути, рыночные промежуточные платформы облегчают транзакции между двумя сторонами рынка, так что оператор платформы мо-

жет взимать плату за стоимость, создаваемую путем подключения этих двух сторон [4].

Благодаря огромному потенциалу решения оффлайновых транзакций с использованием онлайн-платформ, эти виды бизнеса значительно выросли за последние 25 лет. Платформенные компании достигают более высоких операционных прибылей с меньшим количеством сотрудников. Таким образом, эти эффективные компании, отличающиеся сложной и взаимосвязанной природой [5], нужно изучать с разных сторон: с точки зрения бизнеса и управления необходимо анализировать, как проектировать и управлять цифровыми платформами и бизнес-экосистемами для создания ценности для клиентов и заинтересованных сторон, анализировать предпосылки, природу и последствия внедрения цифровых платформ и бизнес-экосистем в новых бизнес-моделях; рекомендуемые функции и структуры в цифровых платформах и др. [6]. С точки зрения экономики и отраслевых рынков необходимо изучать влияние платформ на конкурентную среду, барьеры входа, эффекты сети и концентрацию рынка, а также антимонопольное регулирование; с точки зрения права и комплаенса нужно анализировать вопросы юрисдикции, защиты данных, трудового статуса исполнителей, налоговую оптимизацию и дискриминацию алгоритмов; с точки зрения социологии и психологии нужно исследовать изменение трудового поведения, феномен «гиг-экономики», доверие к алгоритмам, вовлечённость пользователей и социальное неравенство, порождаемое платформами; с точки зрения технологий и архитектуры данных нужно оценивать масштабируемость, интероперабельность, безопасность транзакций и устойчивость к сбоям; наконец, с позиций этики и устойчивого развития нужно рассматривать долгосрочные социально-экологические последствия платформизации, алгоритмическую справедливость и ответственность перед сообществами.

Список используемых источников

1. Berman A., Cano-Kollmann M., Mudambi R. Innovation and entrepreneurial ecosystems: fintech in the financial services industry // Rev Manag Sci. 2020. 16:45–6434.

2. Kazantsev N., Islam N., Zwiegelaar J., Brown A., Maull R. Data sharing for business model innovation in platform ecosystems: from private data to public good // Technol Forecast Soc Change. 2023. 192:122515.

3. Gawer A. Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework // Research Policy, 2014. 43(7), 1239–1249.

4. Thomas L. D. W., Autio E., & Gann D. M. Architectural leverage: Putting platforms in context // Academy of Management Perspectives, 2014. 28(2), 198–219.

5. Wegner D., da Silveira A.B., Marconatto D. A systematic review of collaborative digital platforms: structuring the domain and research agenda // Rev Manag Sci. 2023. https://doi.org/10.1007/ s11846-023-00695-0.

6. Martín-Peña M. L., Lorenzo P. C., Meyer N. Digital platforms and business ecosystems: a multidisciplinary approach for new and sustainable business models // Rev Manag. 2024. Sci 18, 2465–2482. https://doi.org/10.1007/s11846-024-00772-y.

DIGITAL PLATFORMS AS A BASIS FOR THE TRANSFORMATION OF THE COMPETITIVE ENVIRONMENT AND EXISTING BUSINESS MODELS

Kalimullina O.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The emergence of digital platforms and business ecosystems has led to the transformation of the competitive environment and the emergence of new business models, posing difficult challenges for managers and researchers. The development of AI technologies requires fundamentally new approaches to understanding and managing these complex systems, where technological, economic and social phenomena are intertwined. In this regard, an interdisciplinary approach is needed to deeply explore the nature of platforms and ecosystems, open the way to creating more efficient and sustainable business models that can generate value for customers and all stakeholders, as well as identify and mitigate potential risks in a timely manner.

Key words: business ecosystems, digital platforms, business models, sustainable development

УДК 654.739
ГРНТИ 49.33.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЕМ

Г. Р. Катасонова, А. Д. Сотников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются информационные потоки в сфере образования, интегрированные с доменной моделью инфокоммуникаций (ДМИ), представляющие собой формализованный способ представления образовательной информационной среды (ОИС) в виде набора взаимодействующих процессов, что значительно упрощает управление образовательными процессами в деятельности цифровой кафедры.

информационные потоки, система образования, цифровая кафедра, доменная модель инфокоммуникаций, образовательная информационная система

Сегодня в различных предметных областях общества происходит цифровая трансформация, в том числе, в области образовательной информационной среды (ОИС), представляющая собой целостную экосистему цифрового взаимодействия с гибким управлением, передовыми информационными ресурсами и технологическими инструментами с предоставлением каждому обучающемуся персонализированный доступ к учебным материалам и получению знаний.

Проект «цифровые кафедры» реализуется на базе 115 университетов страны. Эти структурные подразделения позволяют студентам 2–3 курсов бакалавриата или специалитета, а также первокурсникам магистратуры, получить востребованные IT-компетенции, не прерывая освоения основной образовательной программы.

Учебный план цифровых кафедр включает вопросы цифровой трансформации, обработки массивов данных (Big Data), разработку готовых цифровых решений, изучение платформ для автоматизации и оптимизации бизнес-процессов. Интегрированное информационное пространство цифровых кафедр служит для эффективного взаимодействия студентов, преподавателей и административного персонала ВУЗа, обеспечивая доступ к актуальной информации через разнообразные цифровые каналы: социальные сети, игровые платформы, информационные ресурсы и метавселенные. Инфор-

мационные ресурсы представляют общую ИТ-инфраструктуру университета, включающая в себя:

– сайт;
– систему управления обучением (LMS);
– библиотеку электронных ресурсов;
– системы хранения данных;
– разнообразные сервисы, тесно связанные между собой.

Для структурирования процессов взаимодействия всех объектов проектирования сложных информационных систем и оптимизации образовательной информационной среды, в целом, используются когнитивный, информационный и физический уровни, составляющие основу доменной модели инфокоммуникаций (ДМИ). Данный подход используется в качестве основного компонента информационного взаимодействия всех участников образовательного процесса на основе описания информационных процессов в системе [1, 2, 3] (рис. 1).



Рис. 1. Доменная модель инфокоммуникаций

В аналитической форме доменная модель [4] описывается выражением:

$$\langle A_1 \rangle^{\xi A_1} \xrightarrow{Q_{12}^{\xi A_1 \xi C_1^1}} \langle \langle A_1 \rangle^{\xi A_1} \rangle^{\xi C_1^1} \xrightarrow{Q_{23}^{\xi C_1^1 \xi B_1}} \langle \langle C_1^1 \rangle^{\xi C_1^1} \rangle^{\xi B_1},$$

или

$$\langle \langle \langle A_1 \rangle^{\xi A_1} \rangle^{\xi C_1^1} \rangle^{B_1},$$

где: A_1, C_1, B_1 – объекты физического, информационного и когнитивного доменов соответственно,

ξ – тезаурусы соответствующих объектов,

Q – операторы преобразования тезаурусов объектов при информационном взаимодействии.

Услуги цифровых кафедр университета реализуются через сетевые платформы, использующие общие цифровые ресурсы, библиотеки данных и вычислительные мощности образовательных учреждений, предоставляя доступ к своим сервисам через сетевые интерактивные платформы и образовательные порталы. Использование ДМИ позволяет представить цифровую кафедру в виде центрального узла [5], в котором циркулируют, преобразуются и обогащаются информационные потоки, обеспечивая динамичность, гибкость и персонализацию всего учебного процесса (рис. 2).

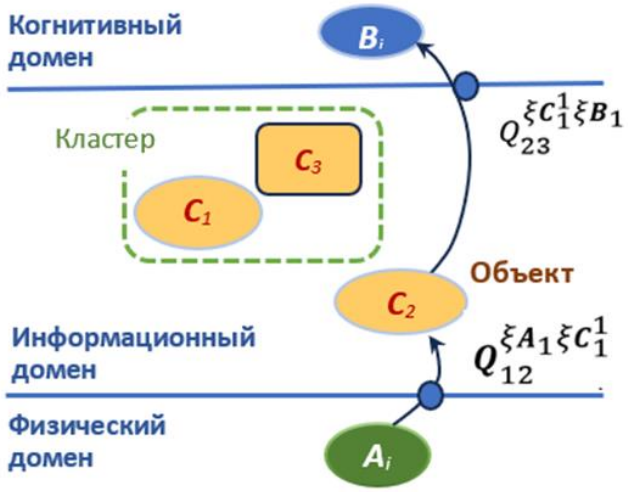


Рис. 2. Упрощенная иллюстрация доменной модели

Сочетание доменной модели инфокоммуникаций и методов оптимизации в виде графов [6] позволяет получить инструмент для проектирования и управления цифровыми образовательными средами, обеспечивающими высокое качество обучения. Оптимизация с «минимальными затратами» и «максимальной производительностью/эффективностью» представляет практический интерес. Внедрение новой системы хранения данных для цифрового архива кафедры должно быть проведено с учетом стоимости оборудования, затрат на обслуживание и электроэнергию, а также с учетом скорости доступа к информации и объема хранимых данных, чтобы обеспечить максимальную эффективность при минимальных затратах.

Доменная модель инфокоммуникаций (ДМИ) – это абстрактное представление образовательной информационной среды, разбивающее ее на взаимосвязанные домены (серверная инфраструктура, сетевые каналы, данные, пользователи), что позволяет грамотно использовать вычислительные

устройства/мощности образовательного учреждения, рационально распределять пиковые нагрузки во время периода максимального использования сети, осуществлять выбор необходимых телекоммуникационных услуг и обеспечивать бесперебойную связь в работе цифровых кафедр между тысячами студентов и преподавателей.

Список используемых источников

1. Катасонова Г. Р., Шкрум А. С. Проектная деятельность студентов медицинского вуза в условиях развития цифровых образовательных технологий // Конструктивные педагогические заметки. 2021. № 9-1 (15). С. 144–164.

2. Катасонова Г. Р., Шкрум А. С. Организация коммуникаций между студентами и преподавателями в условиях нарастания цифровизации общественного пространства // Культура, образование и искусство: традиции и инновации: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Н. Новгород: НГПУ им. К. Минина, 2021. С. 140–145.

3. Катасонова Г. Р., Соломко Ю. С., Сотников А. Д., Стригина Е. В. Модель информационных процессов в виртуальных средах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 4. С. 589–593.

4. Сотников А. Д., Катасонова Г. Р., Стригина Е. В. Анализ современной системы образования на основе доменной модели инфокоммуникаций // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-26. С. 5930–5934.

5. Арзуманян Ю. В., Вольфсон М. Б., Захаров А. А., Катасонова Г. Р., Сотников А. Д. Модели учебных программ для задач оптимизации при конструировании индивидуальных образовательных траекторий // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сб. науч. трудов X Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2021. Т. 4. С. 330–335.

6. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: пер. с англ. М.: Мир, 1981. 323 с.

MODELING INFORMATION FLOWS IN THE EDUCATION MANAGEMENT SYSTEM

Katasonova G., Sotnikov A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines an applied information system–an educational information environment (EIE)–as a set of information flows within an education system based on the information communications domain model (ICD). This formal model allows one to represent a complex system, such as an EIE, as a set of interacting processes formalized using the ICD to decompose a complex task into smaller, more manageable components for managing the education system and digital departments.

Key words: information flows, education system, digital department, domain model of infocommunications, educational information system

УДК 330.341.1: 378.147
ГРНТИ 06.81.23

МОДЕЛЬ ТЕХНОПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКОГО ИНЖИНИРИНГА КАК ИНСТРУМЕНТ ИНТЕГРАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И ИНДУСТРИИ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

Н. В. Кваша, В. В. Макаров, М. Г. Слуцкий

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлена практика внедрения в СПбГУТ модели технопредпринимательского инжиниринга. Модель реализуется через проектно-ориентированные дисциплины, акселерационный формат практических занятий и непосредственное вовлечение отраслевых экспертов. Результатом является формирование у выпускников компетенций инженеров-предпринимателей, способных к коммерциализации создаваемых разработок.

технопредпринимательский инжиниринг, интеграция образования и науки, коммерциализация технологий, инфокоммуникации, проектно-ориентированное обучение, инженер-предприниматель

Актуальной задачей современного технического университета является не только подготовка квалифицированных инженерных кадров, но и формирование у них компетенций, позволяющих трансформировать научно-технические достижения в успешные продукты. Особенно это значимо для динамично развивающейся отрасли инфокоммуникаций, где цикл жизни технологий стремительно сокращается. Традиционное образование часто не успевает за этими изменениями, поддерживая разрыв между академическими знаниями, исследовательским потенциалом вуза и реальными потребностями бизнеса. Для преодоления данного разрыва предлагается к внедрению модель технопредпринимательского инжиниринга, которая в настоящее время интегрируется в образовательную деятельность СПбГУТ. Модель обладает потенциалом масштабирования и может быть адаптирована другими техническими вузами с учетом их специфики.

Технопредпринимательский инжиниринг понимается как системный процесс проектирования и «сборки» специалиста, обладающего двумя ключевыми ролевыми профилями: инженера-разработчика и предпринимателя. Концепция целенаправленного проектировании и формировании специали-

ста нового типа, способного находиться в «суперпозиции» профессиональных состояний, положенная в основу предлагаемой модели, стала сквозной темой IV Всероссийского форума «Техпред 2025», флагманского мероприятия Платформы университетского технологического предпринимательства (входит в федеральный проект «Технологии» нацпроекта «Эффективная и конкурентная экономика») [1].

Научно-теоретическую основу разработки составили результаты исследований в области инноваций, инициированных в 2018–2019 гг. [2, 3] и продолжающихся в настоящее время [4–9]. Эти исследования легли в основу методических разработок, которые воплотились в комплекс учебно-методических материалов. Комплекс включает рабочие программы дисциплин, планы-конспекты лекций и практических занятий, проектные задания, мультимедийные презентации, методики оценки и фонды оценочных средств. Разработка отдельных компонентов данного комплекса под руководством В. В. Макарова в 2022 году была поддержана Благотворительным фондом Владимира Потанина. Все созданные учебно-методические продукты соответствуют предъявляемым требованиям и выполнены на высоком профессиональном уровне.

Предлагаемая модель технопредпринимательского инжиниринга реализуется через следующие взаимосвязанные компоненты:

– *Проектно-ориентированный учебный трек.* На уровне бакалавриата указанные принципы реализованы в дисциплинах «Основы управления проектами» и «Экономика и организация инновационного проекта», формирующих базовое проектное и инновационное мышление. В магистратуре ядро трека составляют дисциплины «Коммерциализация результатов научных исследований и разработок», «Основы коммерциализации технологических достижений», «Цифровые технологии в управлении инновационными экосистемами», где студенты различных направлений работают над реальными проектами, а формой итоговой аттестации служит защита проектов перед экспертами.

В период с 2023 по 2025 гг. реализация модели охватила более 500 студентов широкого спектра направлений – от радиотехники и фотоники до программной инженерии, информационной безопасности и бизнес-информатики.

– *Содержательная интеграция с наукой и индустрией.* Проектная деятельность студентов базируется на реальных и актуальных задачах, а не на абстрактных кейсах. Тематика проектов формируется из нескольких источ-

ников: научных разработок СПбГУТ, включая зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности университета и темы магистерских диссертаций; конкретных запросов индустрии, в том числе через Банк задач Платформы НТИ; а также практических интересов самих студентов. При этом темы проектов соответствуют приоритетным научно-техническим направлениям университета: квантовые коммуникации, сети 6G, оптоэлектроника (фотоника), Интернет вещей и интеллектуальные транспортные системы. В качестве примера в таблице 1 представлен перечень проектных тем, реализованных студентами в рамках одного из учебных курсов.

ТАБЛИЦА 1. Перечень тем проектов 2 семестр 2024г. (уровень – магистр)

№	Тема проекта
1	Многофункциональное умное устройство для автомобилистов
2	Шифратор информации на основе квантового распределения ключей
3	Реабилитация травмированных конечностей на основе 3D-печати
4	Приложение по подбору квартир «для своих»
5	Система «FreshTrack» для отслеживания срока годности товаров (B2C сегмент)
6	Цифровая система разгрузки электросетей
7	Система диагностики аудиокомплекса автомобиля
8	Цифровой инструмент организации поиска работы
9	Приложение для построения туристических маршрутов
10	Устройство информирования пользователя об окончании работы бытового прибора (для лиц с ОВЗ)
11	Платформа для синхронизации медицинских данных (пациент-медицинские учреждения-страховые компании)
12	Платформа для подбора образов на основе локальных брендов
13	Система удаленного доступа к программируемым устройствам
14	Производство сетевого оборудования из отечественных компонентов
15	Система оценивания разработчиков ПО для IT компаний
16	Интеллектуальная система помощи водителю
17	Неинвазивная диагностика заболевания почек
18	Технология управления роем БПЛА для условий ЧС
19	Оптоволоконные датчики дистанционного управления в условиях радиации

Критически важным элементом является прямое участие в учебном процессе практикующих отраслевых экспертов, которые обеспечивают трансфер реальных методологий управления проектами, требований к оформлению документации и понимания рыночных механизмов.

– *Акселерационный формат*. Формат занятий трансформирован в режим образовательного акселератора, где студенческие команды проходят полный цикл от идеи до публичной защиты. В рамках модели создана устойчивая практика проведения демо-дней и питч-сессий как аттестационных мероприятий (рис. 1). Факт внедрения и результаты работы находят отражение в публикациях на официальных новостных ресурсах университета [10-13].
– *Цифровая инфраструктура.* Разработанные электронные материалы размещены в системе дистанционного обучения СПбГУТ на базе Moodle, что обеспечивает студентам онлайн-доступ к курсам и создает основу для разработки глобально ориентированных образовательных продуктов. Для управления проектами использует специализированное ПО, в частности трекеры задач (Битрикс24). Задействование цифровых инструментов обеспечивает прозрачность, доступность и синхронизацию деятельности всех участников процесса.



Рис. 1. Защита проектов на демо-дне по результатам освоения курсов

Эффективность модели подтверждается следующими конкретными, измеримыми результатами интеграции:

– обратная связь: студенты в отзывах отмечают практическую значимость курсов, «связь технологий с реальным рынком» и приобретение навыков лидера команды. Получены благодарности от работодателей выпускников;
– научно-практические результаты обучающихся: студенты публикуют научные работы по тематике коммерциализации [14, 15], участвуют и побеждают в профильных конкурсах и акселерационных программах, что свидетельствует о высоком уровне проектной подготовки;
– интерес реального сектора: модель подтверждает свою востребованность заинтересованностью и прямым участием предприятий инфокоммуникационной отрасли в качестве экспертов и потенциальных работодателей выпускников;
– научно-кадровый выход: под научным руководством одного из авторов модели Макарова В. В. в 2022 году успешно защищена кандидатская диссертация по тематике инновационной кооперации в высокотехнологичных экосистемах [16];
– масштаб: модель охватывает ключевые для отрасли связи направления подготовки, от радиотехники и сетей связи до бизнес-информатики;
– практический кейс «Интеллектуальная система помощи водителю Versta»: В рамках учебной дисциплины был доработан студенческий проект, что привело к заключению соглашения о сотрудничестве с компанией «Смартс» и повысило его шансы на грантовую поддержку. Это прямое доказательство работоспособности цепочки «вуз → студент → индустриальный партнер».

Таким образом, представленная модель технопредпринимательского инжиниринга доказала свою эффективность в качестве практического инструмента интеграции. Она позволяет трансформировать образовательный процесс, сделав его драйвером коммерциализации научного потенциала университета. Основным результатом становится подготовка востребованного индустрией выпускника – инженера-предпринимателя, который не только создает инновации, но и обладает компетенциями для их вывода на рынок. Опыт СПбГУТ может быть тиражирован в других технических вузах, ориентированных на тесное взаимодействие с высокотехнологичными отраслями

Список используемых источников

1. IV Всероссийский форум технологического предпринимательства. URL: https://univerforum.ru (дата обращения: 05.02.2025).

2. Макаров В. В., Шувал-Сергеева Н. С. Управление внедрением инноваций на рынке программного продукта. СПб.: СПбГУТ, 2018. 160 с.

3. Макаров В. В., Стародубов Д. О. Сетевые формы кооперации участников создания инновационной высокотехнологичной продукции // Журнал правовых и экономических исследований. 2019. № 2. С. 203–207. DOI: 10.26163/GIEF.2019.14.75.033.

4. Асеев А. А., Макаров В. В., Верстова В. В. Инновации и наука: проблемы и решения // Экономика и бизнес: теория и практика. 2020. № 7(65). С. 23–26. DOI: 10.24411/2411-0450-2020-10583.

5. Блатова Т. А., Макаров В. В. Тенденции цифровой трансформации в образовании // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). Сборник научных статей IX Международной научно-технической и научно-методической конференции. СПб.: СПбГУТ, 2020. Т. 2. С. 615–619.

6. Макаров В. В., Слуцкий М. Г., Александров М. А. Цифровая трансформация экономики и технологические инновации на предприятии // Проблемы современной экономики. 2021. № 2(78). С. 35–38.

7. Макаров В. В., Синица С. А., Стародубов Д. О. Инновационные экосистемы как перспективный механизм кооперации и формирования радикальных инноваций высокотехнологичного сектора // Проблемы современной экономики. 2023. № 3(87). С. 56–58.

8. Кваша Н. В. Специфика экономической оценки инновационных IT-проектов // Информационные процессы: концептуальный базис цифровой трансформации экономики. Сборник научно-теоретических статей. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 183–190.

9. Макаров В. В., Синица С. А., Стародубов Д. О. Перспективные тенденции инновационного развития в сфере высоких технологий // Проблемы современной экономики. 2025. № 2(94). С. 19–21.

10. Студенты СПбГУТ освоили предпринимательские навыки на занятии по бизнес-планированию // СПбГУТ. URL: https://www.sut.ru/bonchnews/education/22-04-2025-studenti-spbgut-osvoili-predprinimatelskie-naviki-na-zanyatii-po-biznes-planirovaniu(дата обращения: 05.02.2025).

11. На зачетной неделе в СПбГУТ состоялись питч-сессии // СПбГУТ. URL: https://www.sut.ru/bonchnews/education/09-01-2025-na-zachetnoy-nedele-v-spbgut-proshli-pitch-sessii (дата обращения: 05.02.2025).

12. На факультете ИКСС провели демо-день проектов // СПбГУТ. URL: https://www.sut.ru/bonchnews/education/10-06-2024-na-fakultete-ikss-proveli-demo-den-proektov(дата обращения: 05.02.2025).

13. Студенты СПбГУТ сдали зачет с помощью питчей // СПбГУТ. URL: https://www.sut.ru/bonchnews/education/16-01-2024-studenti-spbgut-sdali-zachet-s-pomoschu-pitchey(дата обращения: 05.02.2025).

14. Мельникова Н. И. Развитие инструментария оценки инновационных проектов в форме технологических стартапов / Н. И. Мельникова, П. Л. Ульянова, В. Р. Шарипова // Студенческая весна – 2024: Сборник научных статей 78-ой региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15 мая 2024 года. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2024. С. 177-181. EDN AZEMBL.

15. Юмшанов Д. В., Кваша Н. В. Развитие краудлендинга как альтернативного инструмента инвестирования инновационных проектов / Н. В. Кваша, Д. В. Юмшанов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): Сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методиче-

ской конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 2023 года / Под редакцией С. И. Макаренко, сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. Том 4. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2023. С. 87-91. EDN QUTIED.

16. Стародубов Д. О. Механизм инновационной кооперации в высокотехнологичных экосистемах: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством (управление инновациями)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Стародубов Д. О., 2022. 158 с. EDN:LVMIQI.

THE MODEL OF TECHNO-ENTREPRENEURIAL ENGINEERING AS A TOOL FOR INTEGRATING EDUCATION, SCIENCE AND THE INFOCOMMUNICATION INDUSTRY

Kvasha N., Makarov V., Sluckij M.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article presents the practice of introducing a model of techno-entrepreneurial engineering at SPbSUT. The model is implemented through project-oriented disciplines, an accelerated format of practical classes and the direct involvement of industry experts. The result is the formation of graduates' competencies of entrepreneurial engineers capable of commercializing their developments.

Key words: techno-entrepreneurial engineering, integration of education and science, technology commercialization, infocommunications, project-oriented training, entrepreneur engineer

УДК 330.101
ГРНТИ 06.81.23

ДАННЫЕ КАК НОВЫЙ ВИД ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Н. В. Кваша

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена исследованию данных в качестве принципиально нового вида экономических ресурсов, формирующего потребность в пересмотре традиционных теоретико-методологических оснований экономической науки. Рассматриваются ключевые особенности данных как ресурса (нематериальность, неконкурентность и неисключаемость), а также анализируются порождаемые этими особенностями противоречия в сферах определения стоимости, установления прав собственности и анализа рынков.

цифровизация, данные, экономический ресурс, неконкурентность, неисключаемость, нематериальность

Современный этап экономического развития характеризуется стремительной цифровизацией, в центре которой находятся данные, объемы которых растут экспоненциально, а способность извлекать из них информацию и впоследствии генерировать новые знания становится ключевым фактором конкурентоспособности. В то же время традиционная экономическая теория, сформировавшаяся в эпоху индустриализации для анализа материального производства, демонстрирует свою ограниченность при попытке осмыслить природу и роль данных как нового экономического ресурса [1, 2].

Особенность данных как нового экономического ресурса определяется совокупностью следующих характеристик:

– нематериальность – сами по себе данные не имеют физической субстанции, хотя и фиксируются на каком-либо материальном носителе;
– неконкурентность в потреблении – использование данных одним агентом не уменьшает их доступность или полезность для других;
– низкая исключаемость – достаточно сложно и экономически неэффективно полностью предотвратить несанкционированное копирование и распространение данных.

Указанные свойства данных ставят под сомнение применимость традиционной экономической логики, построенной на принципах редкости и конкурентности.

Несоответствие природы данных классическим теоретическим конструктам порождает ряд фундаментальных противоречий. Так классические теории стоимости (трудовая теория и теория предельной полезности) теряют объяснительную силу. Затраты на производство (сбор) исходных данных могут быть незначительны, а их предельная полезность для отдельного пользователя часто равна нулю. Стоимость данных возникает лишь в определенном контексте, при их агрегировании, обработке и анализе, что требует разработки новой, реляционной или контекстуальной теории ценности.

Кроме того, институт частной собственности как основа рыночной экономики, слабо применим к объекту, который можно бесконечно копировать без издержек. Вопросы о том, кто владеет данными (или должен быть владельцем данных) (пользователь, генерирующий цифровой след; платформа, на которой он это делает; государство), как обеспечить соблюдение прав и каков должен быть режим их оборота, остаются дискуссионными в различных дисциплинах (например, в праве, экономике) [3].

Неконкурентность данных теоретически создает условия для их максимально широкого распространения для повышения общественного благосостояния. В то же время рыночные механизмы, основанные на конкуренции, как правило, ведут к их концентрации и монополизации, создавая другие формы рыночной власти. Это актуализирует вопрос о новой роли государства не только как регулятора, но и как гаранта равного доступа к данным как к общественному благу [4, 5].

Кроме того, доминирование данных как экономического ресурса серьезно трансформирует базовую методологию научного знания, так как от традиционного дедуктивного подхода фокус смещается к индуктивному анализу больших данных [6]. Из-за этого качество экономических прогнозов становится заметно хуже, а значит, страдают и сами решения, которые принимаются на их основе:

Во-первых, даже если алгоритм и выдает точные прогнозы, для лица, принимающего решения, это черный ящик.

Во-вторых, алгоритмы базируются не на причинах и следствиях, а на совпадениях (корреляции). Иными словами, принятые решения могут быть выработаны на основе случайной связи, которая на самом деле ничего не значит.

В-третьих, прогнозы строятся только по тем пользователям, кто активно пользуется цифровыми сервисами. Остальные просто выпадают из анализа, выборка получается нерепрезентативной.

В-четвертых, данные, на которых обучают модели, содержат в себе исторические, устоявшиеся паттерны поведения и предпочтений. В итоге алгоритмы не просто их повторяют, а еще и усиливают имеющиеся стереотипы и дискриминации.

В-пятых, в условиях постоянного наблюдения пользователи меняют свое поведение. Это явление, известное как Хоторнский эффект, достаточно полезное при задействовании организационного механизма, снижает эффективность в рыночных условиях, так как нарушает чистоту экспериментальных данных и ставит под угрозу достоверность исследовательских гипотез [7].

По нашему мнению, преодоление обозначенных противоречий невозможно в рамках одной научной дисциплины, что требует конвергенции различных подходов, в частности, экономического, социологического, философского, правоведения, компьютерных наук и др.:

– экономика задает системные рамки анализа, но при этом должна быть открыта для пересмотра своих аксиом;
– социология и философия позволяют осмыслить социальные последствия товаризации данных, этические границы их использования и прочие феномены (в частности «надзорного капитализма» и др.) [8];
– правоведение разрабатывает, например, новые институциональные формы регулирования цифровых активов;
– компьютерные науки предоставляют понимание технических возможностей и ограничений работы с данными.

Современная ситуация в экономической науке напоминает период научной революции, и именно на пересечении вышеуказанных дискурсов может сложиться новая парадигмальная основа для экономических исследований [6]. Включение данных в хозяйственные отношения как нового вида ресурсов экономики данных требует следующих трансформаций экономической науки:

– признание данных специфическим типом экономического блага, требующим собственного теоретического языка;
– разработку самостоятельных методов измерения вклада данных в экономическое развитие и благосостояние, выходящих за рамки ВВП;

– формирование новых критериев эффективности, учитывающих не только экономическую, но и социальную, экологическую и этическую результативность использования данных;
– создание адекватной исследовательской этики для работы с данными, полученными пассивно и часто без явного информированного согласия.

Таким образом, данные как новый вид экономических ресурсов требуют пересмотра не просто отдельных экономических подходов, но и самой логике экономического мышления, сформировавшейся в индустриальную (доцифровую) эпоху. Их нематериальная и неконкурентная природа делает непригодными традиционные концепции стоимости, собственности и рыночного равновесия. По нашему мнению, преодоление возникающего методологического кризиса лежит на пути трансформации экономической теории через ее интеграцию с другими социальными, гуманитарными и компьютерными науками. Результатом этой трансформации должна стать новая исследовательская парадигма, способная адекватно описывать, объяснять и прогнозировать процессы в экономике, где данные выступают ключевым ресурсом развития, что обуславливает возможность выработки эффективной экономической политики в условиях цифрового будущего.

Список используемых источников

1. Кваша Н. В., Демиденко Д. С., Ворошин Е. А. Трансформация модели индустриального развития в условиях цифровизации экономики // Тенденции развития экономики и промышленности в условиях цифровизации / под ред. А. В. Бабкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 93–116. DOI: 10.18720/IEP/2017.6/3.

2. Кваша Н. В., Воскресенский А. А. Парадигма экономики разума в научно-философском дискурсе // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 5.0 (ИНПРОМ-2024). Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. Т. 1. С. 202–205. DOI: 10.18720/IEP/2024.1/49.

3. Асташова Н. Д., Бобкова Т. В. «Неэкономические» модели цифровой экономики // Вестник Томского государственного университета. 2021. № 470. С. 72–79. DOI: 10.17223/15617793/470/8.

4. Абрамов В. И. Роль государства в стимулировании экономики данных: от поддержки инноваций к созданию инфраструктуры данных // Актуальные проблемы гуманитарных и общественных наук. Сборник статей XI Всероссийской научно-практической конференции. Пенза: ПГАУ, 2025. С. 10–17.

5. Сухарев О. Управление знаниями, информация и экономический рост (часть 2) // Проблемы теории и практики управления. 2015. № 7. С. 118–130.

6. Козырев А. Н. Цифровая экономика и экономика данных // Цифровая экономика. 2024. № 2(28). С. 5–14. DOI: 10.33276/DE-2024-02-01.

7. Торпищев Т. Р. Менеджмент маркетплейсов: от классической школы к экосистемному подходу // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 9, № 9(162). С. 133–143. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.09.09.014.

8. Зубофф Ш. Эпоха надзорного капитализма. Битва за человеческое будущее на новых рубежах власти. М.: Изд-во Института Гайдара, 2022. 784 с.

DATA AS A NEW TYPE OF ECONOMIC RESOURCE

Kvasha N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the study of data as a fundamentally new type of economic resources, which creates the need to revise the traditional theoretical and methodological foundations of economics. The key features of data as a resource (immateriality, non-competitiveness, and non-exclusivity) are considered, as well as the contradictions generated by these features in the areas of determining value, establishing ownership rights, and analyzing markets.

Key words: digitalization, data, economic resource, non-competitiveness, non-exclusivity, immateriality

УДК 614.2
ГРНТИ 76.75.91

РЕГУЛЯТОРНЫЕ ИННОВАЦИИ И СМЕРТНОСТЬ ОТ ПЕРЕДОЗИРОВОК В США: ЕСТЕСТВЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ 2024–2025 ГГ.

А. А. Кобильняк, А. В. Неровный

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Регуляторные инновации последних лет упростили доступ к экстренной помощи и лечению зависимости: налоксон стал безрецептурным, правила терапии метадоном закрепили «гибкие» форматы, а телемедицина получила продление. Эти решения снижают пороги для пациентов и позволяют сопоставлять регионы по фактической доступности, что важно для объяснения падения смертности в Соединенных Штатах Америки в 2024–2025 гг.

опиоидный кризис, смертность от передозировок, налоксон, метадон, телемедицина, политика здравоохранения, естественный эксперимент, США

Опиоидный кризис – это долговременное общественное явление в Соединенных Штатах Америки, связанное с резким и устойчивым ростом количества смертельных передозировок, главным образом тех, в которых участвуют опиоиды. Опиоиды – группа веществ, включающая как легальные обезболивающие, назначаемые врачами, так и нелегальные синтетические соединения, такие как фентанил. Передозировка в медицинском контексте означает состояние токсического воздействия вещества на организм, приводящее к угнетению дыхания и, без своевременной помощи, к смерти. Долгие годы рост таких смертей оставался устойчивым, оказывая глубокое влияние на системы здравоохранения и социального обеспечения страны [1].

В 2024 г. впервые за годы непрерывного роста федеральная статистика показала резкое и существенное снижение смертности от передозировок. По предварительным данным Национального центра статистики здравоохранения (National Center for Health Statistics, NCHS) Центров по контролю и профилактике заболеваний США (Centers for Disease Control and Prevention, CDC) количество зарегистрированных смертей от передозировок в США уменьшилось с 110 037 в 2023 г. до примерно 80 391 в 2024 г., что составляет редкое снижение почти на 27 % год к году. Смертельные случаи, в которых участвовали опиоиды, сократились с 83 140 до 54 743 за тот же период [2]. Из Рис. 1 видно, как эти данные отражают крупнейшее годовое

падение смертности от передозировок за более чем 40 лет наблюдений и возвращают уровень общей смертности к близким к 2019 г. значениям [3].

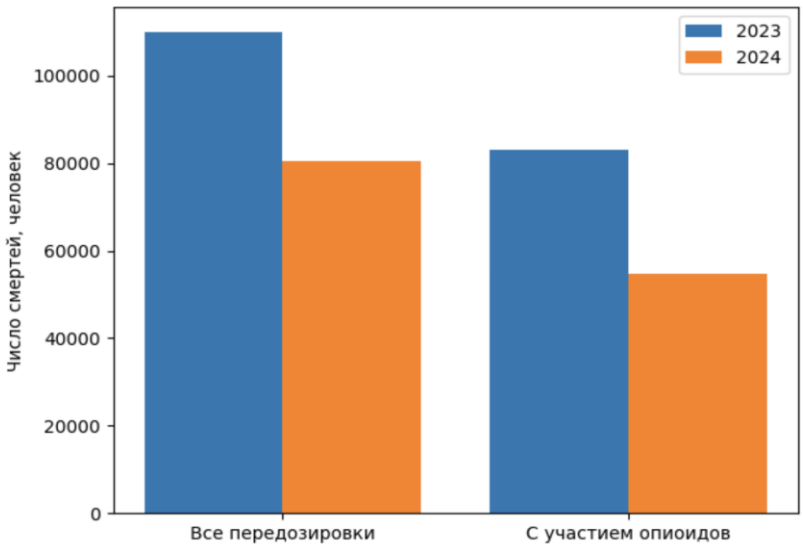


Рис. 1. Смертность от передозировок, 2023–2024

Снижение смертности наблюдалось почти во всех штатах; в ряде из них было даже более выраженным. Так, штаты Луизиана, Мичиган, Нью-Гэмпшир, Огайо, Виргиния, Западная Виргиния и Висконсин, а также округ Колумбия продемонстрировали уменьшение более чем на 35 % по сравнению с 2023 г.; в то же время два штата – Южная Дакота и Невада – зафиксировали небольшое увеличение смертей от передозировок в 2024 г. в сравнении с предыдущим годом [3] (рис. 2). Эти региональные различия свидетельствуют о том, что не все территории испытывают одинаковые эффекты от национальных мер, и что локальные условия, социально-экономический контекст и практики реализации политики играют существенную роль в результатах реагирования на кризис.



Рис. 2. Изменение смертности от передозировок, 2023-2024 гг.

Для понимания таких вариаций важно учитывать характер вмешательств и их реализацию на местах. Одним из ключевых регуляторных шагов стало разрешение Управлением по контролю за продуктами и лекарствами США (Food and Drug Administration, FDA) на продажу назального спрея налоксона без рецепта с марта 2023 г. Налоксон – это медикамент, который способен быстро обратить эффекты опиоидной передозировки, временно блокируя опиоидные рецепторы и давая шанс на выживание до прибытия скорой помощи [4]. Расширение доступа к этому антидоту за пределами аптеки создало условия для раннего вмешательства, особенно в тех сообществах, где аптек мало или где страховка и рецепты часто становятся барьерами для доступа к медицинской помощи.

Кроме того, в апреле 2024 г. вступило в силу обновленное федеральное правило (42 CFR Part 8), облегчающее условия начала и продолжения медикаментозной терапии зависимости от опиоидов, включая методы дистанционной оценки пациентов и упрощение процедур назначения препаратов, таких как метадон и бупренорфин [5]. Эти препараты относятся к медикаментозной терапии зависимости (medications for opioid use disorder, MOUD), цель которой – уменьшение тяги к нелегальным опиоидам и снижение риска рецидивов употребления. Доступ к терапии MOUD исторически был затруднен в сельских районах и среди социально уязвимых групп; устранение некоторых административных барьеров открыло новые возможности для вовлечения в лечение большего числа людей.

Третьим важным регуляторным элементом стало продление телемедицинских послаблений, которые были впервые введены во время пандемии COVID-19 и которые позволяют врачам назначать контролируемые препараты дистанционно до конца 2026 г. [6]. Телемедицина – оказание медицинской помощи и консультаций на расстоянии с использованием электронных средств связи – стала существенным инструментом расширения доступа к лечению для жителей удаленных территорий и для тех, кто не имеет возможности регулярно посещать медицинские учреждения.

Важно подчеркнуть, что сами изменения в федеральных правилах служат скорее контекстом для локальных действий, чем гарантией мгновенного эффекта. Реальные результаты зависят от того, как меры реализуются на уровне штатов, округов и городов. Например, в штате Виргиния распространенные программы снижения вреда, такие как доступ к тест-полоскам на содержание фентанила и бесплатное распространение налоксона в общественных местах, сопоставляются с более выраженным снижением смерт-

ности по сравнению с территориями, где такие практики ограничены. В Канзасе и Миссури расширение программ снижения вреда, включая тест-полоски и автоматы с налоксоном, связывают со значительным падением смертей от передозировок на местном уровне, что подтверждает важность сочетания национальной политики и местных инициатив.

Региональные различия также проявляются в демографических и социальных структурных факторах. Например, по данным CDC, некоторые территории с более высоким уровнем распространения синтетических опиоидов до сих пор сталкиваются с существенно более высокими уровнями смертности, даже при общем снижении национальных показателей. В том числе в предыдущие годы штат Западная Виргиния демонстрировал одни из самых высоких показателей смертей от фентанила на душу населения [3]. Различия между штатами по уровню инфраструктуры здравоохранения, доступу к программам диагностики и лечения, а также по социально-экономическим условиям усиливают неоднородность эффекта от общенациональных регуляций.

Упрощение доступа к медикаментозной терапии зависимости способствует тому, что люди с хронической зависимостью имеют более устойчивый доступ к лечению, что снижает риск острых рецидивов и фатальных исходов. Введение гибких механизмов оценки и дистанционного лечения также снижает бремя бюрократических препятствий и может быть особенно полезным для тех, кто раньше не мог пройти курс лечения из-за необходимости частых личных визитов. Наконец, продление телемедицинских послаблений гарантирует, что эти механизмы не исчезнут с окончанием режима чрезвычайных мер. Это создает условия для более системного и стабильного функционирования сети помощи, особенно в тех сообществах, где медицинские ресурсы ограничены.

Тем не менее снижение смертности в 2024–2025 гг. все еще не означает окончательное разрешение кризиса. Смертность остается выше, чем до пандемии, и опиоидный кризис продолжает быть ведущей причиной смерти для американцев в возрасте 18–44 лет [1]. Существует риск, что сокращение финансирования программ здравоохранения или социальной помощи может ослабить достигнутые успехи, если меры не будут поддерживаться на постоянной основе.

Наблюдаемое снижение смертности от передозировок в США в 2024–2025 гг. тесно коррелирует с серией регуляторных изменений на федеральном уровне и, что важнее, с тем, как эти изменения были реализованы на ме-

стах. Расширение доступа к антидоту, упрощение лечения зависимости и сохранение телемедицинских механизмов создают условия для снижения смертности, но их эффективность проявляется только тогда, когда они сочетаются с локальными инициативами, адаптированными к конкретным социальным и экономическим реалиям каждого штата.

Список используемых источников

1. Overdose Deaths Remain a Leading Cause of Death in the United States // Centers for Disease Control and Prevention. URL: https://www.cdc.gov/overdose/deaths/index.html (дата обращения: 30.01.2026).

2. U.S. Overdose Deaths Decrease Almost 27 % in 2024 // CDC National Center for Health Statistics Pressroom. 2025. 14 May. URL: https://www.cdc.gov/ nchs/pressroom/releases/20250514.html (дата обращения: 30.01.2026).

3. Provisional Drug Overdose Death Counts // CDC National Center for Health Statistics. URL: https://www.cdc.gov/nchs/nvdrs/overdose-deaths.htm (дата обращения: 30.01.2026).

4. FDA Approves First Over-the-Counter Naloxone Nasal Spray // U.S. Food and Drug Administration. 2023. 29 Mar. URL: https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-over-counter-naloxone-nasal-spray (дата обращения: 30.01.2026).

5. Medications for the Treatment of Opioid Use Disorder // Federal Register. 2024. URL: https://www.federalregister.gov/documents/2024/01/30/ medications-for-opioid-use-disorder (дата обращения: 30.01.2026).

6. Telemedicine Flexibilities for Prescribing Controlled Substances Extended // U.S. Department of Health and Human Services. 2024. URL: https:// www.hhs.gov/about/news/2024/telemedicine-flexibilities-extended.html (дата обращения: 30.01.2026).

Статья представлена заведующим кафедрой ИиРВ СПбГУТ, кандидатом исторических наук, доцентом А. Б. Гехтом.

REGULATORY INNOVATIONS AND OVERDOSE MORTALITY IN THE UNITED STATES: A NATURAL EXPERIMENT 2024–2025

Kobilnyak A., Nerovny A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Regulatory innovations in recent years have simplified access to emergency care and addiction treatment: naloxone became available over-the-counter, methadone therapy regulations have enshrined «flexible» formats, and telemedicine has been extended. These solutions lower patient thresholds and allow for regional comparisons based on actual accessibility, which is important for explaining the decline in mortality in the United States in 2024–2025.

Key words: opioid crisis, overdose mortality, naloxone, methadone, telemedicine, health policy, natural experiment, United States

УДК: 372.8:811
ГРНТИ: 16.31.51

ЦИТИРОВАНИЕ КАК СТИМУЛИРУЮЩИЙ ПРИЕМ В ОРГАНИЗАЦИИ ДИСКУССИЙ НА ПРЕДТЕКСТОВОМ ЭТАПЕ РАБОТЫ С ТЕКСТОМ

А. В. Кузьмина, Е. В. Ткачева, О. М. Федорова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Рассматривается принцип устного опережения в обучении иностранному языку. Данная статья рассматривает вопрос использования приема цитирования на предтекстовом этапе работы с основным текстом, а именно афоризмов, пословиц и поговорок на занятиях по английскому языку. Делается вывод о том, что прием цитирования является эффективным способом развития коммуникативных способностей у учащихся, поддержания интереса учащихся к английскому языку, повышения эффективности работы на уроках. В статье представлены методические рекомендации по эффективной организации дискуссий с помощью приема цитирования на занятиях по английскому языку.

иностранный язык, принцип устного опережения, активные методы обучения, предтекстовые задания, коммуникативные задания, цитирование

Перед техническими вузами стоит важная задача: молодые специалисты должны владеть высоким уровнем знаний иностранного языка, чтобы в своей будущей профессии использовать его на практике.

На сегодняшний день современный выпускник технического вуза не способен конкурировать на рынке труда из-за недостаточного объема профессиональной лексики по своей специальности и несвободного владения языком. Это затрудняет профессиональную и иноязычную коммуникацию и делает ее менее эффективной. Так, в ходе опроса 90 % работодателей считают, что современные специалисты в первую очередь обязаны уметь разговаривать на профессиональные темы. В то же время 75 % опрошенных работодателей полагают, что перевод технической документации с описанием функционирования и технического обслуживания различных устройств является основным умением, которое требуется от специалистов со знанием иностранного языка [1].

Принцип устной основы, или методический принцип устного опережения, заключается в устной проработке учебного материала на предтексто-

вом этапе работы с основным текстом, т.е. на речевой практике. Первоочередной задачей обучения на практическом курсе является овладение устной иноязычной речью в соответствии с принципом устного опережения [2].

Принцип устного опережения происходит из прямого метода обучения иностранным языкам, возникший во второй половине XIX – начале XX вв. Со временем классический переводной метод овладения устной иноязычной речью показал себя неэффективным, в результате пришлось прибегнуть к новым методам. Французский педагог Франсуа Гуэн – один из сторонников прямого метода – утверждал, что появление устной речи должно предшествовать появлению письменной речи. Ф. Гуэн также полагал, что при овладении иностранным языком обучающийся должен повторить путь усвоения языка подобно ребенку, который начинает вникать в свой родной язык.

Воспроизведение устной речи всегда считалось основной целью изучения языка. Процесс этот приводил к созданию искусственной языковой среды, похожей на ту, что окружает ребенка при овладении им родной речью. Например, родной язык исключался из преподавания, и учащиеся понимали значение слова из контекста, наглядных средств или объяснения преподавателя. При этом грамматику также специально не отрабатывали, поскольку считалось, что ей можно овладеть интуитивно, так же как ее усваивает ребенок в родной речи.

Основным аргументом в пользу прямого метода обучения стал факт появления устной речи намного раньше письменной. Это привело к пониманию, что человек усваивает родной язык сначала в устной форме, а письменная речь есть лишь фиксированная устная речь, следовательно, нужно сначала научиться говорить и понимать, а это уже обеспечит и умение читать, и умение писать. Во многих современных учебниках по изучению иностранного языка принцип устного опережения преподносится в качестве устных вводных курсов, которые рассчитаны приблизительно на два – четыре месяца [3].

Несмотря на все достоинства применения принципа устного опережения некоторые специалисты, развивая навык усвоения устной речи у учащихся, все же выделяют недостатки. Во-первых, есть сомнения, эффективно ли строить все обучение на слуховом восприятии, так как известно, что большинство людей попросту не обладает слуховой памятью, а скорее зрительной или смешанной. Значит, такое обучение будет бесполезно. Во-вторых, согласно психологии, чем больше анализаторов участвует в усвоении учебного материала, тем оно надежнее, и поэтому этим

важным фактором для успешного овладения учебного материала не стоит пренебрегать.

Е. И. Пассов, будучи известным сторонником коммуникативного подхода, полагает, что устное опережение следует понимать не только и не столько во временном аспекте, но и в количественном, в виду того что в процессе обучения речедвигательный анализатор имеет большое значение. Соглашаясь, в принципе, с мнением Е. И. Пассова, нужно отметить, однако, что устное опережение следует отнести, прежде всего, к временному аспекту. Подразумеваются общеизвестные предтекстовые упражнения, которые представлены во многих популярных пособиях по иностранному языку и направлены на устное введение в темы, подробно изложенные в самом тексте.

Согласно коммуникативному подходу, задания на развитие разговорных навыков будут преобладать среди других видов речевой деятельности. В процентном соотношении говорение может соотноситься с другими видами речевой деятельности как 30: 70, при этом последнее число включает чтение, письмо и аудирование [3-5].

Таким образом, выполнение студентами определенных предтекстовых заданий заключается в применении принципа устного опережения. Хотелось бы на практике проверить, насколько эффективно можно использовать, например, цитирование для вовлечения студентов в дискуссию в работе на предтекстовом этапе.

Однозначно, что занятия по изучению иностранного языка должны быть не только полезными, но и увлекательными для учащихся. К сожалению, обсуждение и цитирование высказываний известных людей, предусмотренные в ходе подготовки к восприятию темы, как правило, игнорируются большинством студентов. Лишь единицы в аудитории готовы процитировать высказывание известного деятеля, остальные студенты считают, что это задание их не касается, и отмалчиваются. Из этого получается, что только самые замотивированные студенты включаются активно в работу, анализируя и комментируя. Выявляя проблему пассивности учащихся, стоит пересмотреть проведение мини-дискуссий с применением активных методов обучения.

Активные методы обучения – это методы, включающие парную работу, ролевые игры, дискуссии и т.д. Они нацелены на активизацию познавательной деятельности обучающихся, что вызывает рост мотивации в изучении иностранного языка. А. А. Вербицкий считает, что активное обучение зна-

менует собой переход от преимущественно регламентирующих, алгоритмизированных, программированных форм и методов организации дидактического процесса к развивающим, проблемным, исследовательским, поисковым условиям для творчества в обучении, обеспечивающим рождение познавательных мотивов и интересов. Активные методы обучения – это, фактически, методы, которые побуждают учащихся к активной мыслительной и практической деятельности в процессе овладения учебным материалом.

Для развития и активизации языковых навыков в процессе обучения иностранным языкам преподаватель, как правило, применяет различные методы. Снова обратимся к цитированию и рассмотрим более подробно этот прием обучения при изучении английского языка, который помогает эффективно решить многие дидактические задачи. Во-первых, обсуждение мудрых слов и мыслей на иностранном языке способствует увеличению словарного запаса у учащихся. Во-вторых, во время чтения высказывания учащиеся отрабатывают произношение. В-третьих, обсуждение цитат вносит неоценимый вклад в активизацию мыслительных способностей учащихся, поскольку, осуществляя перевод, прежде чем высказаться, учащиеся сначала формируют ответ у себя в голове. В-четвертых, прием цитирования помогает расширению кругозора.

Согласно большой российской энциклопедии под цитатой (лат. cito – вызывать, приводить) понимают дословную выдержку из какого-либо текста или точно приводимые чьи-либо слова. Иногда часть цитаты опускается, а ее отсутствие отмечают многоточием [6].

Цитирование как прием обучения английскому языку выполняет следующие функции: обучающие, развивающие, воспитательные и мотивирующие. Учащиеся отрабатывают произношение, а также активизируют произносительные навыки. Кроме того, учащиеся тренируют навыки перевода и увеличивают свой словарный запас. Развивающие функций проявляются в совершенствовании аналитических способностей, расширении кругозора во время усвоения экстралингвистической информации, развитии умения выражать свои мысли на родном и иностранном языках. Что касается педагогических функций, то они способствуют формированию у учащихся моральных и нравственных принципов, возникновению доброжелательного отношения к культуре и традициям народа изучаемого языка. Мотивационные функции несет в себе появление и развитие интереса к изучению английского языка посредством чтения на языке оригинала, а

также познавательных способностей, вырабатывается устойчивое отношение к жизни [7].

На занятиях английского языка важную роль отводят знакомству с афоризмами, пословицами и поговорками. Они представляют собой основные виды вдохновляющих фраз. Афоризм, происходящий от греческого «афорисмос» (краткое изречение), представляет собой краткое изречение, содержащее законченную мысль, философскую или житейскую мудрость, поучительный вывод, обобщающий смысл явлений. Термин «афоризм» впервые применил Гиппократ, использовав его в заглавии своего медицинского трактата. С появлением письменности и книгопечатания афоризмы стало возможным записывать, а впоследствии и систематизировать в тематические сборники. Так, в форме изречений люди пытались выразить значимые для них мысли. Нужно отметить, что жанр афоризмов остается востребованным и по сей день [7].

В английских афоризмах прочно закрепились отголоски мировоззрения носителей языка, и, анализируя эти короткие фразы, учащиеся не только усваивают живой язык, но и овладевают экстралингвистической информацией.

Не только через афоризмы можно понять жизнь и язык людей. В пословицах и поговорках – мудрых, с поучительным смыслом, метких, острых и кратких по форме народных изречениях – передаются из поколения в поколение практические советы, правила поведения и нормы жизни [7]. И учащиеся, подбирая аналог в родном языке, учатся анализировать, сравнивать, что дает возможность лучше понять, оценить и полюбить свой родной язык. Кроме того, на занятиях по иностранному языку в разгар дискуссии, затрагиваемой проблемные вопросы, пословицы и поговорки часто используются как средство развития коммуникативных навыков.

Конечно, только обсуждая цитаты современных людей ни в ком случае нельзя выучить английский язык, но на предтекстовом этапе в качестве триггера можно использовать, для того чтобы вызвать интерес у учащихся к предстоящей изучаемой теме урока.

Цитирование также следует рассматривать как стимулирующий прием в организации учебно-познавательной деятельности учащихся при изучении английского языка. Несомненно, мудрые мысли в виде афоризмов или высказываний современных людей, а также пословицы и поговорки представляют собой полезный материал для изучения английского языка, поскольку их применение на занятиях прежде всего содействует повыше-

нию мотивации к изучению английского языка, а также вносит неоценимый вклад в развитие языковой компетенции учащихся.

Стоит признать пользу от применения активного метода обучения при работе с цитатами в качестве предтекстовых заданий для студентов первого курса по дисциплине «Иностранный язык» на всех технических направлениях, получающих степень бакалавра в Санкт-Петербургском техническом университете им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Необходимо также отметить основное учебное пособие, по которому проводится аудиторная работа, оно разработано преподавателями кафедры иностранных и русского языков Санкт-Петербургского технического университета им. проф. М. А. Бонч-Бруевича Е. Ф. Сыроватской, Е. П. Желтовой, А. Б. Комиссаровым, Н. Н. Никифоровой [8]. Этот учебник направлен на развитие деловых коммуникаций в устной и письменной форме на иностранном языке для студентов с учетом их профессионально-ориентированного направления.

Учащиеся получают цитаты на английском языке для обсуждения в парах и высказывают свое мнение, используя, например, выражения «I think that …»; «I don’t think that …»; «In my opinion…»; «I agree / disagree».

Неоспоримым преимуществом приема цитирования можно считать не только развитие устной речи, логики и значительного увеличения словарного запаса, но и расширение кругозора учащихся.

Прежде всего цитаты следует выбирать в соответствии с темой занятия, чтобы затем плавно перейти к основному тексту. На практике прием цитирования закрепляется следующим образом: каждый студент получает карточки с цитатами, не более 4-6, и в течение 10 минут рассуждает о прочитанном. После обсуждения возникших вопросов преподаватель предлагает одну или две самые интересные цитаты из этих карточек для общей расширенной дискуссии. Изучение основных тем также подкрепляется чтением и анализом высказываний известных личностей, пословиц и поговорок. Так, например, в работе над темой «Work» прибегают к помощи афоризмов. Учащиеся выделяют в них качества, необходимые для успешной работы человека, и, наоборот, качества, которые будут препятствовать продвижению по службе. Есть задания, в которых учащиеся самостоятельно демонстрируют качества, гарантирующие успех в учебе и на предприятии. Решая подобные задачи, студенты активно делятся своими мнениями, используют новую лексику, почерпнутую в ходе знакомства с афоризмами, а

именно настойчивость, целеустремленность, находчивость, умение работать в команде, трудолюбие.

Для того чтобы убедиться в эффективности использования активного метода обучения с применением дискуссионных карточек, студентам первого курса Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций (СПбГУТ) было предложено пройти опрос с целью выяснения их отношения к такому виду дискуссий при изучении английского языка. Всего в анкетировании приняло участия 45 человек в возрасте 17-19 лет.

В результате выяснилось, что 90 % респондентов понравилось нововведение на занятиях, поскольку у них появилась возможность высказать свое мнение по интересующим их вопросам. Половина из них отметили, что теперь не надо проявлять инициативу и бояться неверных ответов, так как тема обсуждается совместно. В результате такой тактики активность студентов значительно возросла, что в свою очередь отразилось на посещаемости. К сожалению, 10 % опрошенных остались безразличны к изменениям в проведении занятий, поскольку иностранный язык не является для них приоритетом. На вопрос о том, хотели бы они, чтобы преподаватель продолжал вести занятия, следуя данной тактике, 85 % ответили утвердительно. Остальные опрошенные сообщили, что преподаватель в праве сам выбирать форму подачи информации.

Таким образом, понятно, что прием цитирования нравится большинству учащихся и у каждого из них появляется возможность высказаться во время общей дискуссии. Это самый важный фактор для развития устной речи и формирования хороших коммуникативных навыков.

Использование приема цитирования на предтекстовом этапе работы с основным текстом, а именно афоризмов, пословиц и поговорок на занятиях по английскому языку является эффективным способом развития коммуникативных способностей у учащихся и поддержания интереса к английскому языку, а также повышения качества работы на уроках, так как они помогают внести элемент игры и соревнования в процесс усвоения языка.

Применение приема цитирования превращает занятия по английскому языку в своего рода дискуссионный научный клуб, где обсуждаются интересные и важные для учащихся вопросы, такие, как важность учебы и работы. Тем самым, создаются предпосылки для активного развития коммуникативной компетенции учащихся.

Список используемых источников

1. Котельникова Е. Ю., Шпортько И. А. К вопросу об обучении иноязычной лексике в техническом вузе // Вестник ПНИПУ. Проблемы языкознания и педагогика. 2016. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-obuchenii-inoyazychnoy-leksike-v-tehnicheskom-vuze (дата обращения: 27.01.2026).
2. Принцип устной основы и принцип устного опережения // StudFiles. URL: http://www.studfiles.ru/preview/4224883/page:3/ (дата обращения: 27.01.2026).
3. Прямые методы обучения // Ozlib. URL: https://ozlib.com/832513/literatura/pryamye_metody_obucheniya(дата обращения: 27.01.2026).
4. Зимовец К. В. Активные методы обучения иностранному (английскому) языку // Образовательная социальная сеть nsportal.ru. 2012. URL: http://nsportal.ru/shkola/inostrannye-yazyki/library/2012/09/27/aktivnye-metody-obucheniya-inostrannomu-yazyku-podborka(дата обращения: 27.01.2026).
5. Князева А. Я. Активные методы обучения как способ развития коммуникативных УУД на уроках иностранного языка // Копилка уроков. URL: https://kopilkaurokov.ru/angliiskiyYazik/prochee/aktivnyie-mietody-obuchieniia-kak-sposob-razvitiia-kommunikativnykh-uud-na-urokakh-inostrannogho-iazyka (дата обращения: 28.01.2026).
6. Прямой метод // Большая российская энциклопедия. URL: https://old.bigenc.ru/literature/text/4678142 (дата обращения: 27.01.2026).
7. Соболева А. В. Цитирование как стимулирующий прием в организации учебно-познавательной деятельности учащихся на уроках английского языка // Проблемы и перспективы развития образования. Материалы IV Международной научной конференции. Пермь: Меркурий, 2013. С. 98–100. URL: https://moluch.ru/conf/ped/archive/72/4061/(дата обращения: 09.01.2026).
8. Английский язык для бакалавров ИКТ и телекоммуникаций: учебник / Е. Ф. Сыроватская, Е. П. Желтова, А. Б. Комиссаров [и др.]. СПб.: СПбГУТ, 2020. 283 с.

QUOTATION AS A STIMULATING METHOD IN ORGANIZING DISCUSSIONS AT THE PRE- TEXT STAGE OF WORKING WITH A TEXT

Kuzmina A., Tkacheva E., Fedorova O.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article deals with the principle of oral advancement in teaching a foreign language. This article describes the usage of the quotation technique at the pre-text stage of working with the main text, namely aphorisms, proverbs and sayings in English classes. It is concluded that the quotation technique is an effective way to develop students' communicative skills, to maintain students' interest in the English language, and to improve the work efficiency in the classroom. The article presents methodological recommendations for the effective organization of discussions by using the quotation technique in English classes.

Key words: foreign language, principle of oral advancement, active teaching methods, pre-text tasks, communicative tasks, quotation

УДК 004.896
ГРНТИ 50.41.25+28.23.29

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ С КЛИЕНТАМИ (CRM)

Е. Ю. Лутовинова
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена исследованию ключевых аспектов интеграции технологий искусственного интеллекта в современные CRM-системы. Рассматриваются основные функциональные направления: предиктивная аналитика, чат-боты и виртуальные помощники, а также системы персональных рекомендаций. Особое внимание уделяется трансформации клиентского опыта и повышению операционной эффективности бизнес-процессов. Анализируются потенциальные риски и этические вызовы, связанные с внедрением ИИ. Результаты исследования позволяют сформировать практические рекомендации для успешной цифровой трансформации клиентского сервиса.

искусственный интеллект, CRM-системы, предиктивная аналитика, чат-боты, гиперперсонализация, клиентский опыт, риски внедрения

В современной бизнес-среде, характеризующейся высоким уровнем конкуренции и постоянно растущими ожиданиями потребителей, компании сталкиваются с необходимостью повышения эффективности взаимодействия с клиентами. Ключевыми факторами успеха становятся персонализация коммуникаций и скорость обработки данных, поскольку именно они определяют лояльность клиентов и устойчивость бизнеса на рынке.

Традиционные подходы к управлению взаимоотношениями с клиентами (CRM) демонстрируют свою ограниченность перед лицом ряда вызовов. Объем данных о клиентах растет экспоненциально, что делает невозможным их ручную обработку. Потребители ожидают мгновенного отклика, в то время как стандартные маркетинговые кампании уже не отвечают потребности в индивидуализации предложений. Кроме того, реагирование на уже свершившиеся события, такие как отток клиента, является менее эффективным, чем их прогнозирование и предотвращение. Поддержание высокого уровня сервиса вручную также требует значительных ресурсов. Указанные факторы обусловливают необходимость трансформации CRM-систем из простых инструментов учета в интеллектуальные платформы, способные к анализу, прогнозированию и автономным действиям.

Современный рынок CRM-систем характеризуется активным переходом к облачным моделям. Согласно имеющимся данным, в России в 2019 г. на долю SaaS-решений приходилось 38 % рынка в денежном выражении, а к 2025 г. рост увеличился до 61 %. На глобальном уровне этот показатель увеличится с 75 % в 2019 г. до 87 % в 2025 г. [1]. Несмотря на положительную динамику, уровень проникновения CRM в России остается низким: лишь 17 % компаний используют такие системы, тогда как в Европе этот показатель достигает 40 %, а в США – 90 %. При этом 55 % российских компаний вообще не осведомлены о возможностях CRM [1]. Данный факт подчеркивает значительный потенциал для роста и актуализирует задачу популяризации интеллектуальных решений в этой сфере.

Искусственный интеллект выступает ключевым катализатором этой трансформации, переводя CRM в категорию инструментов прогностического управления. Интеграция ИИ позволяет автоматизировать рутинные задачи, повысить точность прогнозирования и персонализировать взаимодействие с клиентами, что дает компаниям устойчивое конкурентное преимущество в условиях цифровой экономики [2].

Внедрение технологий искусственного интеллекта в CRM-системы реализуется через ряд функциональных направлений, каждое из которых решает специфические бизнес-задачи. Обобщенная характеристика этих направлений представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные направления применения ИИ в CRM

Направление	Решаемые задачи	Применяемые технологии
Предиктивная аналитика	Скоринг лидов, прогнозирование оттока (churn rate), определение следующего лучшего действия (next best action)	Логистическая регрессия, случайные леса (Random Forest), XGBoost, нейронные сети
Чат-боты и виртуальные ассистенты	Обработка типовых запросов 24/7, классификация пользователей, анализ тональности, генерация контекстных ответов	Обработка естественного языка (NLP), генеративные модели, интеграция с базами знаний
Гиперперсонализация	Персонализированные рекомендации, динамическое ценообразование, адаптация каналов и времени коммуникации, прогнозирование потребностей	Анализ больших данных, машинное обучение, анализ поведенческих факторов в реальном времени

Как следует из таблицы, предиктивная аналитика использует исторические данные и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования будущих событий. В рамках CRM она решает задачи скоринга лидов, позволяя менеджерам фокусироваться на наиболее перспективных клиентах [2]. Система выявляет признаки возможного ухода клиента (снижение активности, негативные отзывы), что дает возможность своевременно предложить спецпредложение или улучшить качество обслуживания [3]. Кроме того, на основе анализа текущей ситуации ИИ предлагает оптимальный следующий шаг, будь то звонок, отправка уточняющего вопроса или передача сделки другому менеджеру [3].

Сфера применения предиктивных моделей не ограничивается только взаимодействием с клиентами. Они также находят применение в управлении товарными запасами, позволяя на основе оценки спроса прогнозировать необходимые объемы складских остатков, а также в динамическом ценообразовании, адаптируя цены под текущий уровень спроса и поведение клиента [1]. Таким образом, ИИ способствует более экономному подходу к повышению конкурентоспособности и максимизации прибыли.

В свою очередь, чат-боты и виртуальные ассистенты на базе ИИ автоматизируют обработку первичных запросов. Современные системы эволюционировали от простых скриптов к генеративному ИИ, способному вести гибкие и естественные диалоги [2]. Такие боты могут обрабатывать запросы в круглосуточном режиме, классифицировать пользователей и направлять их к нужным специалистам, а также анализировать тональность сообщений для выявления недовольных клиентов и передачи их оператору. Генерация ответов происходит с учетом контекста диалога и истории взаимодействий.

Третьим ключевым направлением является гиперперсонализация, представляющая собой глубокий уровень адаптации взаимодействия с клиентом. В отличие от обычной персонализации, она использует более детальные данные и учитывает контекст в реальном времени, что создает у клиента ощущение истинного понимания его потребностей компанией. Примером могут служить персонализированные рекомендации продуктов на основе истории покупок, динамическое ценообразование, зависящее от спроса и истории клиента, а также определение предпочтительного канала и времени для коммуникации [4]. Система способна предсказать, когда клиенту потребуется повторный сервис, и предложить его заранее [4].

Интеграция рассмотренных выше технологий оказывает комплексное влияние на клиентский опыт и операционную эффективность бизнеса.

Прежде всего, наблюдается значительное сокращение времени реакции на запросы. Чат-боты обрабатывают до 80 % типовых запросов в круглосуточном режиме, что позволяет снизить время ожидания клиентов, освободить сотрудников поддержки от рутинных задач и повысить общую удовлетворенность [5]. Как показывает практика, время первого контакта с лидом может сократиться с нескольких часов до 15 минут [5].

Одновременно с этим повышается точность прогнозов продаж. ИИ анализирует исторические данные о продажах, поведении клиентов и маркетинговых кампаниях, учитывая сотни переменных, недоступных классическим моделям. Это позволяет прогнозировать будущие продажи с точностью на 20–40 % выше традиционных методов, а также определять наиболее перспективные сегменты клиентов [5].

Влияние на ключевые метрики бизнеса проявляется в нескольких аспектах. Пожизненная ценность клиента (LTV) повышается за счет персонализации коммуникаций и своевременного предложения релевантных продуктов [5]. Конверсия растет благодаря автоматизации квалификации лидов и прогнозированию вероятности закрытия сделок. Удержание клиентов (Retention) улучшается за счет предсказания оттока и запуска автоматических сценариев удержания, что может увеличить Retention на 10–30 % [5].

Важным эффектом является автоматизация рутинных задач сотрудников. ИИ берет на себя ввод данных, извлекая информацию из документов и писем для автоматического заполнения полей в CRM [6]. Системы способны расшифровывать звонки и протоколировать встречи, формируя резюме бесед и фиксируя договоренности. Кроме того, ИИ анализирует звонки и чаты для контроля качества коммуникаций, а также генерирует ответы на запросы и коммерческие предложения, что существенно сокращает время на подготовку документации [6].

Помимо автоматизации ввода данных и коммуникаций, современные интеллектуальные CRM-системы способны анализировать эффективность работы персонала и прогнозировать перспективы дальнейшего сотрудничества с конкретным покупателем, что позволяет оптимизировать распределение задач и повышать результативность команды [1].

Наряду с очевидными преимуществами, внедрение ИИ в CRM сопряжено с рядом рисков и этических вызовов, которые требуют пристального внимания. Ключевым условием эффективности ИИ является качество данных. Наличие дубликатов, пропусков или неструктурированных записей приводит к неточным результатам и ошибочным прогнозам [7].

Не менее важным аспектом выступает конфиденциальность и соответствие нормативным требованиям. CRM-системы на базе ИИ активно используют данные клиентов, что повышает риски утечек и нарушений законодательства. В России действует Федеральный закон № 152-ФЗ «О персональных данных», который обязывает компании получать согласие пользователей и обеспечивать безопасность данных [8]. Использование публичных ИИ-сервисов создает дополнительные угрозы, поскольку данные могут обрабатываться на сторонних серверах. Для минимизации рисков рекомендуется применение защищенных архитектур, таких как приватные облака, а также шифрование данных и протоколирование действий ИИ-агентов [8].

Существует также проблема алгоритмической предвзятости. ИИ может неосознанно наследовать и усиливать предубеждения, присутствующие в обучающих данных, что приводит к дискриминации клиентов по возрасту, полу или региону проживания [9]. Это особенно опасно, когда ИИ влияет на значимые решения, например, в кредитном скоринге. Для минимизации этого риска необходима оценка справедливости моделей с использованием специальных метрик и проверка данных перед обучением [10].

Наконец, нельзя игнорировать риск дегуманизации, связанный с потерей эмпатии при чрезмерной автоматизации общения. Несмотря на эффективность в обработке рутинных запросов, чат-боты не способны полностью заменить человеческое взаимодействие в сложных или эмоциональных ситуациях [11]. Чрезмерная стандартизация может заставлять клиентов адаптироваться к ограничениям системы, упрощая язык или меняя поведение, что снижает удовлетворенность. В связи с этим рекомендуется использование гибридных моделей «человек + ИИ», где автоматизация ограничивается ситуациями, требующими эмоционального интеллекта и нестандартного подхода [11].

Проведенный анализ позволяет заключить, что интеграция искусственного интеллекта в CRM-системы представляет собой не замену человека, а мощный инструмент усиления его компетенций. ИИ берет на себя рутинные задачи и предоставляет аналитические инсайты, позволяя сотрудникам сосредоточиться на стратегическом взаимодействии. Успешное внедрение ИИ требует не только технологических решений, но и продуманной стратегии.

На основании изложенного можно сформулировать ключевые условия успешной цифровой трансформации клиентского сервиса. Фундаментом эффективной работы ИИ является чистота и качество данных, что предпо-

лагает проведение аудита, стандартизацию форматов и обеспечение интеграции CRM с другими системами. Рекомендуется поэтапная интеграция, начиная с автоматизации типовых процессов и тестирования на ограниченном сегменте перед масштабированием. Критически важным является гибридный подход (AI + Human), обеспечивающий баланс между автоматизацией рутины и человеческим участием в сложных кейсах. Необходимо также соблюдать этические и юридические нормы, обеспечивая прозрачность использования ИИ и исключая алгоритмическую предвзятость. Завершающим этапом выступает постоянный мониторинг ключевых метрик и оптимизация моделей на основе обратной связи.

Грамотно интегрированный ИИ в CRM становится конкурентным преимуществом: он повышает лояльность клиентов за счет персонализации, снижает операционные издержки и предоставляет бизнесу инструменты для роста на основе данных.

Список используемых источников

1. Крюкова А. А., Гайдук А. Е., Захарченко Г. В. Специфика применения искусственного интеллекта в современных CRM-системах // Индустриальная экономика. 2023.№2.URL:https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-primeneniya-iskusstvennogointellekta-v-sovremennyh-crm-sistemah (дата обращения: 09.02.2026).

2. AI CRM – автоматизация продаж и взаимодействия с клиентами // vtiger. URL: https://www.vtiger.com/ru/ai-crm/ (дата обращения: 10.02.2026).

3. Предиктивная аналитика в CRM: прогнозирование успешности сделок и поведения клиентов // profi-soft. URL: https://profi-soft.kz/articles/prediktivnaya-analitika-v-crm-prognozirovanie-uspeshnosti-sdelok-i-povedeniya-klientov/ (дата обращения: 25.02.2026).

4. ИИ в CRM: Революция сервиса в 2025! // profi-soft. URL: https://blog.skgroups.ru/iskusstvennyj-intellekt-v-crm-dlja-servisnogo-biznesa-trendy-2025/ (дата обращения: 10.02.2026).

5. Как заставить ИИ в CRM работать на вас: режимы и управляемые сценарии // Татцентр.ру. URL: https://tatcenter.ru/rubrics/razbor/kak-zastavit-ii-v-crm-rabotat-na-vas-rezhimy-i-upravlyaemye-sczenarii/ (дата обращения: 11.02.2026).

6. ИИ-автоматизация CRM и колл-центров | Анализ звонков, заполнение CRM // itglobal. URL: https://itglobal.com/ru-ru/own-solutions/ainergy/avtomatizacziya-rutinnyh-proczedur-v-crm-i-koll-czentrah/ (дата обращения: 09.02.2026).

7. ИИ в CRM-системах: какие задачи могут решать нейросети // skillbox. URL: https://skillbox.ru/media/marketing/ii-v-crm-sistemah-kakie-zadachi-mogut-reshat-neyroseti/ (дата обращения: 10.02.2026).

8. ИИ ассистент для продаж – как обеспечить безопасность базы клиентов // МБС AI. URL: https://mbsgroup.ru/blog/kak-obespechit-bezopasnost-bazy-klientov/ (дата обращения: 11.02.2026).

9. Искусственный интеллект в HR: применение, инструменты и внедрение в управлении персоналом // SimpleOne. URL: https://simpleone.ru/blog/ai-in-hr (дата обращения: 10.02.2026).

10. Чудинова Д. С. Применение искусственного интеллекта в управлении жизненным циклом клиента: модели сегментации, персонализации и удержания // Парадигма. 2025. № 6-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-v-upravlenii-zhiznennym-tsiklom-klienta-modeli-segmentatsii-personalizatsii-i-uderzhaniya (дата обращения: 11.02.2026).

11. Как CRM-специалисту сделать нейросеть своим союзником, а не конкурентом // cossa. URL: https://www.cossa.ru/itagency/330947/ (дата обращения: 11.02.2026).

KEY ASPECTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES APPLICATION IN CUSTOMER RELATIONSHIP MANAGEMENT (CRM) SYSTEMS

Lutovinova E.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the study of key aspects of artificial intelligence technologies integration into modern CRM systems. The main functional areas are considered: predictive analytics, chatbots and virtual assistants, as well as personal recommendation systems. Special attention is paid to the transformation of customer experience and improvement of business processes operational efficiency. Potential risks and ethical challenges associated with AI implementation are analyzed. The research results allow formulating practical recommendations for successful digital transformation of customer service.

Key words: artificial intelligence, CRM systems, predictive analytics, chatbots, hyper-personalization, customer experience, implementation risks

УДК 628.336.712
ГРНТИ 87.53.22

РЕКУПЕРАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЯ ИЗ ОСАДКОВ РЕАГЕНТНОЙ ДЕФОСФОТИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД

Н. Е. Манвелова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Утилизация осадков сточных вод (ОСВ), полученных при реагентной дефосфотизации, в настоящее время является технологической проблемой. Организация малоотходного цикла реагентной дефосфотизации путем повторного использования соединений алюминия, извлеченных из осадков, представляет перспективный подход, позволяющий снизить эксплуатационные затраты очистных сооружений и уменьшить антропогенную нагрузку на окружающую среду. В статье представлены результаты экспериментальной проработки вариантов рекуперации соединений алюминия из осадков сточных вод, образующихся на различных этапах технологической схемы очистки сточных вод Юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга.

осадки сточных вод, соединения алюминия, коагулянты-реагенты дефосфотизации, переработка, повторное использование

Осадки сточных вод – это водная суспензия минеральных и органических веществ различного состава и происхождения-побочный продукт очистки сточных вод. Такие осадки содержат значительные количества органических соединений, солей, гидроксидов тяжелых металлов нерастворимых фосфатов и т.д., что определяет сложность их состава и необходимость дальнейшей обработки. Особое внимание уделяется соединениям алюминия, которые широко применяются в качестве коагулянтов для удаления различных видов загрязнителей из воды, в том числе в качестве реагентов-осадителей, используемых в технологии реагентной дефосфотизации бытовых сточных вод.

На Юго-Западных очистных сооружениях Санкт-Петербурга внедрена высокоэффективная технология комбинированной биологической и реагентной дефосфотизации СВ, обеспечивающая удаление фосфатов до установленных нормативов. Действующая схема биологического глубокого удаления фосфора с чередованием анаэробно-аэробных условий способствует накоплению фосфора в активном иле. Бактерии активного ила обладают

свойством при стрессовых условиях (чередование анаэробно/аэробных зон) удалять из сточных вод большее количество фосфатов – до 10 % по сухому веществу. Удаленные в биомассу фосфаты должны быть выведены из системы с избыточным активным илом. Однако, при длительном контакте уплотненного биологического ила и сырого осадка в баках смешения осадка происходит высвобождение фосфатов. В этой связи в 2006 году на ЮЗОС началось дозирование коагулянта «Ферикс-3» (10 % раствор сульфата железа) в баки смешения осадка (импортный реагент). В 2012 сульфат железа был заменен на отечественный алюминия сульфат (алюминий сернокислый водный раствор 7,5 %). Цель дозирования – снятие вторичных загрязнений по фосфатам в фугате после центрифугирования. Без применения реагента вторичные загрязнения по массе составляли до 15-20 % от общей массы фосфатов, поступающих в аэротенки (концентрация PO4-P в фугате достигала 300 мг/л). Добавление коагулянта снизило концентрацию фосфатов в фугате до 50 мг/л. Средняя доза коагулянта за последний год составила 1,25 кг/м3 осадка, поданного на обезвоживание. Однако регулярное использование реагентов-осадителей, в частности сульфата алюминия, сопровождается значительным расходом химических реагентов и приводит к образованию больших объемов алюмосодержащих осадков. При этом, получение на основе ОСВ сорбентов и регенерация соединений алюминия из ОСВ для повторного применения в очистке СВ является одним из перспективных направлений утилизации данных многотоннажных отходов очистных процессов [1].

В статье рассматривается возможность переработки осадков сточных вод, образующихся на стадии реагентной дефосфотизации с целью повторного использования соединений алюминия в процессах очистки воды.

Одним из наиболее доступных и распространенных реагентно-термических способов получения сорбентов на основе промышленных отходов, в том числе ОСВ, является обработка концентрированной серной кислотой при повышенных температурах. Применительно к осадку от реагентной дефосфотизации СВ, важным достоинством данного метода является возможность одновременного получения сорбентов и перевода соединений алюминия в водорастворимую форму. Последнее достигается наиболее эффективно при использовании концентрированной кислоты, так как при разбавленной процесс будет тормозиться противоположно направленной реакцией гидролиза тем в большей степени, чем больше воды содержит система. При этом, в 80-х годах XX века на примере шлам-лигнина Байкаль-

ского ЦБК были разработаны и испытаны два способа [3, 4] получения сорбентов на основе ОСВ, содержащего соединения алюминия путем его обработки концентрированной серной кислотой, основное различие которых состоит в том, что в первом из них ОСВ обрабатывают избытком серной кислоты, которую затем удаляют промывкой полученного сорбента водой на фильтрах. При этом в фильтрат переходит не только избыточная кислота, но и переведенные в водорастворимую форму соединения алюминия, что приводит к получению двух различных продуктов: сорбента (сульфокатионита) и подкисленного раствора коагулянта. Второй способ [3] предусматривает обработку ОСВ при минимальном расходе серной кислоты, необходимом для обугливания органической части осадка и перевода, содержащихся в нем соединений алюминия в водорастворимую форму, с последующим использованием полученного продукта взамен коагулянта без предварительной промывки.

В 2025 году на ЮЗОС совместно со специалистами ВОДОКАНАЛ СПб были впервые изучена возможность и условия получения сорбентов на базе осадка сточных вод ЮЗОС СПб, образующегося на стадии реагентной дефосфотизации (ОсРД). В качестве первоосновы были приняты способы переработки [2-4], однако своеобразие состава ОсРД и условий его выделения вызвали необходимость проведения поисковых экспериментальных исследований с целью выявления особенностей процесса обработки концентрированной серной кислотой. Была предложена и подтверждена экспериментально возможность сокращения расхода серной кислоты при обработке ОсРД. Установленное нами оптимальное весовое соотношение серной кислоты (ρ = 1,84 г/мл) к сухому веществу ОсРД составляет 0,75 – 0,9: 1,0. Заметим, что равномерное распределение столь малых объемов серной кислоты в массе ОсРД очень трудно обеспечить при использовании для обработки воздушно-сухого ОсРД. Поэтому целесообразно использовать осадки влажностью 65-80 %. Они представляют собой легко перемешиваемую гелеподобную массу, в которой равномерно распределяются любые количества серной кислоты. Вместе с тем, сокращение расхода серной кислота и повышение исходной влажности ОсРД повлекло за собой необходимость выявить оптимальный для этих условий температурный режим, с том, чтобы обеспечить надлежащую степень обугливания органического вещества ОсРД.

Обработку ОсРД проводили в фарфоровом реакторе при перемешивании, необходимая температура достигалась электроподогревом, выход про-

дукта (сорбента) при указанном режиме составлял 80-90 % от исходного сухого вещества. При обработке ОсРД серной кислотой осуществляется перевод соединений алюминия из малорастворимого гидроксильного состояния в растворимый сульфат алюминия, что приводит к получению продукта, обладающего свойствами коагулянта-реагента осадителя при реагентной дефосфотизации СВ. Механизм воздействия серной кислоты, на минеральную часть ОсРД, по-видимому, сводится к извлечению сульфата алюминия в результате взаимодействия кислоты с продуктами гидролиза.

Кроме этого отметим, что при реагентно-термической обработке концентрированной серной кислотой органическое вещество ОсРД, в свою очередь, претерпевает изменения, связанные с многообразными, одновременно протекающими и трудно поддающимися точному описанию, процессами конденсации, деструкций, частичного обугливания. Элементный химический состав органической компоненты ОСВ для городских сточных вод после стадии биологической очистки может быть в первом приближении представлен в виде обобщенной формулы – $C_{54}H_{212}O_{82}N_8S_7$. В результате высокотемпературной обработки концентрированной серной кислотой происходит обуглероживание органического вещества и развитие его поверхности, образование карбонизированного продукта на основе осадка реагентной дефосфотизации (кОсРД). На начальном этапе исследований установление свойств кОсРД было сведено к задаче проверки его способности использоваться в качестве реагента-осадителя для процесса осаждения фосфатов СВ, взамен сульфата алюминия. Установлено, что применение кОсРД, в зависимости от способа обработки серной кислотой, обеспечивает снижение концентрации фосфатов в очищаемой СВ на 13-70 %. Последнее обстоятельство может явиться основой для разработки малоотходного по соединениям алюминия цикла реагентной дефосфотизации СВ, что является задачей последующих разработок.

Таким образом, изучены методы извлечения алюминия из ОсРД с последующим образованием сульфатов алюминия. Рассмотрены способы регенерации реагентов-осадителей и их эффективность при повторном применении. Показано, что использование повторно полученных соединений алюминия позволяет снизить расход первичных коагулянтов, уменьшить количество отходов и создать замкнутый по соединениям алюминия цикл реагентной дефосфотизации СВ.

Список используемых источников

1. Елистратова А. Р., Манвелова Н. Е. Экологические проблемы переработки осадков сточных вод, поиск наиболее эффективной технологии утилизации // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. В 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 3. С. 206–210.

2. Манвелова Н. Е., Трусов А. С. Исследование дефосфатизации сточных вод на примере Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. В 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2021. Т. 3. С. 241–246.

3. Способ обработки отработанных химикатов натронного производства полуцеллюлозы: авт. свидет. SU 1010170 A1 / Пушкарева Н. Е., Вольф И. В., Ковальчук В. С. и др. № 3373584; заявл. 30.12.1981; опубл. 07.04.1983. Бюл. № 13.

4. Способ переработки шлам-лигнина сульфатного или натронного производства целлюлозы или полуцеллюлозы: авт. свидет. SU 1027308 A1 / Пушкарева Н. Е., Симонов А. Д., Вольф И. В., Ковальчук В. С. № 3370491; заявл. 30.12.1981; опубл. 07.07.1983. Бюл. № 25.

RECOVERY OF ALUMINUM COMPOUNDS FROM REAGENT DEPHOSPHORIZATION SLUDGE OF WASTEWATER

Manvelova N.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Sewage sludge generated during reagent dephosphorization is a source of secondary environmental pollution due to its complex composition, including aluminum compounds, and the potential negative consequences of improper handling. Disposal of such wastewater sludge (WWS) is currently a technological challenge. Reusing aluminum compounds extracted from the sludge, using a low-waste cycle of reagent dephosphorization of WWS, represents a promising approach for reducing the operating costs of treatment facilities and mitigating the anthropogenic impact on the environment. This article presents the results of an experimental study of options for recovering aluminum compounds from wastewater sludge generated at various stages of the wastewater treatment process at the Southwest Wastewater Treatment Plant in St. Petersburg.

Key words: sewage sludge (WWS), aluminum compounds, dephosphorization coagulants, WWS recycling, reuse of aluminum compounds

УДК 330.16
ГРНТИ 06.03

ШЕРИНГОВАЯ ЭКОНОМИКА КАК ТРАНСФОРМАЦИЯ ИНСТИТУТА СОБСТВЕННОСТИ И МОДЕЛИ ПОТРЕБЛЕНИЯ В ЦИФРОВОМ ОБЩЕСТВЕ

А. В. Мешков, А. А. Симонина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается ряд теоретических проблем экономики шеринга: дается авторское определение этого явления, указывается какие сферы экономической деятельности можно отнести к этой модели, рассматривается трансформация института частной собственности и переход от «общества всеобщего потребления» к обществу рационального потребления, в котором значительно полнее удовлетворяются общественные потребности при все более ограниченных экономических ресурсах.

шеринговая экономика, экономика доступа, цифровая платформа

Шеринговая экономика (от английского sharing – делиться, совместно использовать) или экономика совместного потребления, явление относительно новое. Она развивается во всем мире и в России около 15 лет, однако темпы роста и масштабы весьма впечатляют. С 2015 по 2025 год размер шеринг-экономики в мире вырос с 15 миллиардов долларов до 335 миллиардов долларов и к 2031 году [1] со среднегодовым темпом роста около 30 % должен достичь 1,8 триллиона долларов.

Но, несмотря на столь внушительные размеры этого сегмента экономики, многие теоретические аспекты этого процесса недостаточно рассмотрены и разработаны. Существует множество определений шеринг-экономики и в зависимости от того, какое определение используется, разные авторы включают в ее структуру различные сегменты хозяйства, в том числе такие, которые по мнению авторов данной статьи к шеринговой модели вообще не имеют отношения.

Авторы данной статьи под шеринговой экономикой понимают такую социально-экономическую модель, при которой происходит добровольный отказ от частной собственности на ресурс (благо, товар, услугу) в пользу временного доступа к этому ресурсу на возмездной или безвозмездной основе с использованием цифровых технологий. Причем, этот отказ не только

и не столько из-за недостатка денежных средств, а в первую очередь из-за желания расширить свободу выбора.

Таким образом, в понимании авторов, ключевая характеристика экономики шеринга это трансформация института собственности. Традиционное право собственности эволюционирует к режиму «право на в ременный доступ». Веками господствовало представление о том, что для того, чтобы получить право пользования (то есть право применения полезных свойств ресурса), надо сначала приобрести право владения (то есть возможность осуществлять физический контроль над благом и его использованием). Однако, режим частной собственности зачастую – это довольно дорогой режим. Владелец ресурса несет издержки, связанные не только с приобретением, но и с хранением, защитой от посягательств других людей, утилизацией и т.п. данного ресурса. При этом, многие дорогостоящие блага используются собственником лишь незначительное время «жизни» этого блага. Например, легковой автомобиль используется по назначению в среднем лишь 5 % времени своего существования, перфоратор – 30-40 минут в год, дорогостоящее медицинское оборудование используется фирмой-владельцем 55 % времени возможного полезного использования, а до 27 % рабочих мест в классических офисах пустует. Таким образом, шеринг – это отказ от владения ресурсом в пользу временного доступа с целью экономии трансакционных издержек, прежде всего издержек спецификации (исключения других субъектов из доступа к благу) и защиты прав собственности. В литературе можно встретить суждение, что шеринг – это отказ от частной собственности в пользу коллективной. Авторы же статьи считают, что шеринг – это процесс трансформации института собственности вообще, а не только режима частной собственности. Во-первых, использовать шеринговую модель могут не только потребители, но и фирмы, находящиеся в коллективной собственности (кооперативы, товарищества, акционерные общества), предоставляя, например, дорогостоящее оборудование в пользование другим фирмам. Во-вторых, пользователь получает временный доступ к благу без права распоряжаться им, например, автомобиль в каршеринг и, таким образом, не становится его совладельцем, то есть форма собственности не меняется.

В различных источниках встречаются разные переводы и толкования термина sharing economy. Это экономика совместного потребления, экономика участия, доверия, экономика сотрудничества, долевая экономика. Авторы данной статьи полагают, что главная особенность шеринговой эконо-

мики – это отказ от владения в пользу временного доступа и предлагают свою интерпретацию термина экономика шеринга – экономика доступа.

Исходя из этого определения, некоторые виды деятельности, которые часто относят к шерингу, на самом деле таковыми не являются. Например, некоторые источники утверждают, что самым распространенным видом шеринга в России является продажа подержанных вещей с помощью цифровых платформ [2]. В этой модели действительно присутствует важный признак шеринг-экономики-взаимодействие субъектов сделки с помощью цифровых платформ, но интернет-торговля (неважно – новыми или подержанными вещами) шерингом не является, т. к. шеринг, как говорилось ранее, это передача владельцем вещи на время другому пользователю в период, когда владелец в этой вещи не нуждается. При интернет-торговле происходит смена владельца вещи.

Термин «экономика совместного пользования» по отношению к шерингу является, на взгляд авторов статьи, также не совсем корректным, т.к. создается впечатление, что владелец и лицо, получающее от него право временного доступа, используют ресурс совместно. На самом же деле, речь идет о разделении права владения и права пользования между субъектами.

Авторы также считают, что не совсем правомерно относить к шерингу и экономику дарения. Речь идет, например, о фудшеринге, под которым понимается безвозмездное распределение продуктов питания, которые на данный момент времени являются для их владельцев избыточным запасом. Здесь речь опять же идет о передаче продуктов от одного владельца другому.

Наряду с мнимым, существует также скрытый шеринг как форма потребительского оппортунизма. А. Федоров в статье «Почему шеринговая экономика стал терять популярность» [3] утверждает, что шеринговые ресурсы в России, начиная с 2020 года, вытесняются маркетплейсами. Люди меньше арендуют, а больше приобретают вещей на маркетплейсах. С точки зрения авторов, здесь происходит не падение популярности шеринга, а возникновение нового его вида – скрытого шеринга. Вместо того, чтобы арендовать дорогостоящие вещи, люди покупают их на маркетплейсах, используют в течение 1-3 недель, а затем возвращают обратно маркетплейсу. Например, одежду без дефектов можно вернуть на «Озон» в течение 21 дня, исправную бытовую технику – в течение 7 дней. Таким образом, определенная часть недобросовестных покупателей стала фактически использовать маркетплейсы как шеринговые платформы, получая вещь во временное

пользование, причем бесплатно. Больше половины россиян хотя бы раз в год возвращали вещи в онлайн-магазины, 15 % делали это многократно. Бесконтрольный возврат вещей приводит к росту издержек продавца, увеличивает сроки доставки, снижает доверие покупателей к онлайн-торговле. Представляется, что эту проблему использования онлайн-магазинов, как бесплатных пунктов проката, не решить без изменений в законодательстве и правилах торговли на маркетплейсах. Сейчас по закону «О защите прав потребителей» покупатель может вернуть товар, купленный дистанционно, в течение 7 дней, причем ограничений по категориям как при офлайн-торговле почти нет. Это создает основу для оппортунистического поведения потребителя. Доля возвратов в интернет-торговле равна примерно 30 %, тогда как в офлайн-торговле этот показатель не превышает 9 %.

Таким образом, в соответствии с вышеприведенным определением шеринг-экономики, как экономики доступа из ее структуры, по мнению авторов, следует исключить перепродажу подержанных вещей через цифровые платформы, дарение вещей и продуктов питания, но следует включить «серый шеринг», когда потребитель приобретает вещь в онлайн-магазине не с целью владения, а с целью временного и бесплатного доступа.

Какие же сегменты, безусловно, стоит отнести к экономике шеринга? Это краткосрочная аренда жилья (сервис Airbnb, возникший в 2008 году, имеет сегодня капитализацию 88 млрд. долларов. В России это сервисы «Островок» и «Суточно.ру».

Коливинг – это сообщество совместно проживающих творческих людей, объединенных общими интересами и жизненной философией. Это не коммунальная квартира в общепринятом смысле, большинство жителей поселились там временно для реализации совместных творческих проектов и общения. В Санкт-Петербурге это коливинг «Триглинки», его можно посетить с экскурсией, познакомиться с обитателями, почувствовать особую творческую атмосферу.

Наиболее известен каршеринг-сервис поминутной аренды автомобилей. В Петербурге наибольшей популярностью пользуются такие каршеринговые фирмы, как «Делимобиль», «Ситидрайв» и Яндекс-драйв.

Следующие по популярности, особенно среди молодежи, стали велошеринг и кикшеринг – аренда велосипедов и самокатов соответственно. В Петербурге наиболее популярны Яндекс GO, Urent, Whoosh.

Интересно, что в России уже появились сервисы шеринга транспорта премиум-класса, что опровергает расхожее мнение «шеринг – это для бедных». В этом сегменте можно арендовать у владельцев самолет или яхту.

Коворкинг – рабочие пространства для фрилансеров.

Краудфандинг – поиск частных инвесторов и сбор средств для реализации бизнес-идей, творческих и благотворительных проектов.

В промышленности аренда машин, оборудования, инструментов, помещений практикуется большинством предприятий. Таким образом, шеринговые модели подходят не только для сегментов B2C, C2C, но и для сегмента B2B.

Довольно распространенным является мнение, что шеринг – это просто прокат, который существовал задолго до возникновения цифровой экономики и ничего принципиально нового в экономику он не привнес. Авторы считают, что шеринг является революцией в отношении собственности и во многом меняет модель потребительского поведения. Действительно, и раньше люди пользовались арендой или прокатом, но в первую очередь потому, что не имели возможности приобрести желаемый ресурс во владение. И только развитие цифрового общества привело к массовому осознанию того, что во многих случаях приобрести временный доступ к ресурсу выгоднее, чем владеть им.

Классическая теория потребительского поведения исходит из того, что потребитель действует рационально, стремясь создать для себя набор благ, который обеспечит ему максимальное удовлетворение потребностей при существующем бюджетном ограничении. Однако, еще основоположник институциональной экономической теории Т. Веблен в своей «Теории праздного класса» [4] доказывал, что потребитель далеко не всегда рационален в своем выборе благ, а зачастую и иррационален. Он стремится иметь в частной собственности как можно больше благ, т.к. это владение позволит собственнику выделиться среди остальных членов общества и поднять свой престиж. Им движут такие нерациональные с экономической точки зрения мотивы как демонстративное престижное потребление, завистливое сравнение и т.д.

Шеринговая экономика – это отказ от модели сверхпотребления и переход к модели рационального потребления. Все больше людей, особенно молодых, стремятся к мобильности, осознавая частную собственность как обузу и ограничение и выбирают отказ от владения в пользу доступа. С точки зрения авторов, потребительская революция началась в 2008-2010 го-

дах и была вызвана двумя факторами. Во-первых, мировой экономический кризис 2008-2009 годов привел к изменению вкусов и предпочтений потребителей. Расточительное демонстративное потребление при сокращающихся ресурсах планеты неизбежно должно привести общество всеобщего потребления к обществу всеобщей нищеты. Во-вторых, цифровые технологии достигли той степени зрелости, когда стало возможным создание цифровых платформ, обеспечивающих быстрое и простое взаимодействие множества незнакомых людей, одни из которых владеют ресурсом, а другие желают получить его во временный доступ. Быстро развивающиеся системы рейтингов и отзывов обеспечивают достаточный уровень доверия между незнакомыми людьми, чтобы система могла эффективно функционировать. Еще 20 лет назад поселить незнакомого человека в своей квартире или отдать свою вещь в пользование незнакомцу казалось немыслимым, а теперь это реалии шеринговой экономики.

Список используемых источников

1. Абрамян В. Расширение делением «Коммерсантъ».2025. июнь URL: https://www.kommersant.ru/doc/7798336 (дата обращения: 17.02.2026).

2. Петров М. Делим все: как развивается шеринг-экономика в России. //СБЕР Про Медиа. 2020. Май URL: https://sber.pro/publication/delim-vse-kak-razvivaetsia-shering-ekonomika-v-rossii/ (дата обращения: 18.02.2026).

3. Федоров А. Почему шеринговая экономика в России стала терять популярность // Журнал «Forbes». 2024. Июль. URL: https://www.forbes.ru/mneniya/516431-bol-se-ne-prokatit-pocemu-seringovaa-ekonomika-stala-terat-popularnost (дата обращения: 20.02.2026).

4. Веблен Т. Теория праздного класса. М.: Издательство «АСТ», 2021. 384 с.

THE SHARING ECONOMY AS A TRANSFORMATION OF THE INSTITUTION OF PROPERTY AND THE CONSUMPTION MODEL IN A DIGITAL SOCIETY

Meshkov A., Simonina A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines a number of theoretical problems of the sharing economy: it gives the author's definition of this phenomenon, indicates which areas of economic activity can be attributed to this model, examines the transformation of the institution of private property and the transition from a «society of universal consumption» to a society of rational consumption, in which public needs are significantly more fully satisfied with increasingly limited economic resources.

Key words: sharing economy, access economy, digital platform

УДК 338.244.42
ГРНТИ 06.81.12

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ВУЗА В УСЛОВИЯХ РЕФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ

С. А. Никифорова, А. В. Федорова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Постановка задачи: в настоящее время вследствие геополитических изменений в мире наблюдаются активные процессы реформирования сферы образования в стране, тем самым предлагая руководству, учредителям и собственникам учебных заведений находить новые пути развития и укрепления потенциала учреждений. Целью работы является исследование предпосылок к внедрению новых систем и практик экономического развития учреждений высшего образования, необходимостью минимизации негативных последствий реформ и прогнозировании высоких показателей работы вузов. Используемые методы: разбор мнений научной общественности путем выявления сильных и слабых сторон новой системы, поиск путей «мягкого» перехода без снижения показателей экономической эффективности вуза. Новизна: элементами новизны представленного решения является аккумулирование опыта работы автора в рамках приемной кампании вуза в течение нескольких циклов и применение эмпирического подхода в исследовании. Результат: использование представленных вариантов управления изменениями позволяет снизить риски потери эффективности работы вуза. Теоретическая/Практическая значимость: комплексный подход с выполнением предложенных задач позволит высшему учебному заведению успешно провести намеченные реформы без снижения экономических показателей.

реформа высшего образования, экономическое развитие, управление изменениями

Актуальность

С давних времен и по сегодняшний день сфера высшего образования выступает гарантом стабильности и устойчивости, поддерживает конкурентоспособность страны в мировом сообществе, является ключевым звеном экономического и социального статуса. Образование людей можно рассматривать как эффективный фактор экономического роста [1]. Следовательно, только при высоком уровне качества полученного образования велика вероятность интенсификации темпов развития общества.

Данное исследование определено тенденциями к внедрению новых систем и практик экономического развития учреждений высшего образования, разработкой системы управления изменениями при нестабильности

внешней среды, необходимостью минимизации негативных последствий реформ и прогнозировании высоких показателей работы вузов.

Постановка задачи

Проблематикой работы является поиск методов управления экономическими показателями при воздействии следующих факторов: уменьшение цифр приема на государственном уровне на места с оплатой стоимости обучения по некоторым специальностям высшего образования, тем самым уменьшение выручки от приносящей доход деятельности, растущая конкуренция по дополнительным образовательным программам, уменьшение числа желающих получать высшее образование вследствие активной пропаганды среднего профессионального. Вузам требуется модернизировать систему управления, активно включать стратегическое планирование и повышать эффективность работы как административного персонала, так и научно-педагогических кадров. При этом следует учитывать отсутствие единой методической базы по планируемым изменениям и единой платформы общения заинтересованных сторон.

Отдельно следует учесть, что со стороны государства реализовываются мероприятия, нацеленные на доведение информации о планах реформирования системы образования, проводятся семинары, конференции и совещания. Так, с начала 2025 года введен в действие новый порядок проведения мониторинга образовательных организаций, устанавливающий обновленную процедуру учета показателей, контролируемых Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки. Кроме этого, проводится внешний аудит наполнения сайтов вузов на предмет соответствия актуальным требованиям, во многих отраслевых вузах разработан и выполняется план мероприятий по реализации программы повышения конкурентоспособности (так называемая «Дорожная карта») [2].

Материалы исследования

Экономическое развитие вуза в современных реалиях неразрывно связано с стратегией, маркетингом и поиском потенциальных потребителей услуг, определяемое необходимостью решения таких задач как:

– составление карты стратегических целей, миссии;
– раскрытие потенциала, проработка сильных сторон;
– структурирование системы управления и контроля;

– оптимизация бухгалтерского и управленческого учета, их согласованность;
– разработка моделей решений при неблагоприятных внешних условиях в разрезе экономически значимых проектов;
– усиление системы краткосрочного планирования, бюджетирования с возможностью быстрого реагирования на изменения;
– тщательный подбор персонала, занятого экономическим развитием как залог эффективности команды управленческого звена;
– мониторинг степени удовлетворенности потребителей услугами образовательного характера, создание здоровой конкурентной среды;
– продвижение инноваций, участие в мероприятиях содействия научно-техническому прогрессу, развитие бренда.

Основные цели реформы высшего образования состоят в отказе от Болонской системы, внедрение новой модели базового и специализированного высшего образования с усилением практической подготовки обучающихся и тесным сотрудничеством с потенциальными работодателями [3]. Учебные планы предполагается разрабатывать с учетом запросов отраслевых компаний, участвующих в целевом обучении будущих специалистов.

Экономически это можно выразить в преобразовании механизма подготовки кадров, переходе к гибким срокам обучения для оптимизации бюджетных расходов, способствовании успешному и своевременному трудоустройству выпускников.

Здесь также стоит отметить два важных фактора, укрепляющих веру реформаторов в успех преобразований.

Первое, это набирающая обороты система кредитования договоров обучения банками по субсидированной процентной ставке, дающая возможность практически любому желающему, набравшему минимальный проходной бал для поступления, получить средства для оплаты обучения на платной основе. При прекращении обучения в течение полугода выпускник или отчисленный студент имеет возможность трудоустройства, имея отсрочку по оплате основного долга по кредиту. С одной стороны, это, безусловно, действенный рычаг для привлечения в вузы «студентов-платников», повышения ответственности молодежи за результаты обучения, мотивация к поиску работы по имеющимся компетенциям. С другой стороны, это повышение долговой нагрузки на первокурсника, часто сомневающегося в выбранной специальности или в выбранном учебном заведении, низкая степень маневренности при желании изменений, особенно студентам мужского

пола, которым смена формы и вида обучения чревата перерывом в обучении на 12 месяцев для прохождения службы по призыву.

Второе – это обучение по «целевой квоте» – также является весьма эффективным инструментом привлечения абитуриентов с последующим трудоустройством и получением социальных гарантий от государства. В некотором смысле обучение от работодателя тоже выступает в роли «кредитования». Это одна из особенностей предлагаемой реформы, так называемый «принцип многоканальности финансирования». Реализация этого принципа обеспечивается партнерским участием предприятий и организаций государственного сектора в прямом или опосредованном финансировании вузов.

Выводы

В системах финансирования вузов, наряду с государственными ассигнованиями, важную роль играют доходы, которые получены университетами самостоятельно. Денежные средства от приносящей доход деятельности направляются на социальную поддержку профессорско-преподавательского состава, прочего персонала, обучающихся, модернизацию материально-технической базы, а также на улучшение качества образовательных программ. В условиях экономической нестабильности учебные заведения вынуждены активизировать свою хозяйственную деятельность, расширять спектр платных услуг, находить новые источники дохода. Для этого управленческому персоналу в целях повышения эффективности необходимо анализировать потребности различных рынков, включая рынок труда, интеллектуальной собственности, образовательных и прочих услуг. Углубленное изучение потребительского спроса и рационализация затрат становятся ключевыми элементами стратегии выживания и развития университетов.

Только комплексный подход позволит высшему учебному заведению с пользой пройти трудные времена перемен, получить бесценный опыт управления изменениями и выйти в новые реалии сильным участником рынка услуг в сфере образования.

Список используемых источников

1. Арсаханова З. А., Атаева А. А. Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова Реформы высшего образования и проблемы их реализации в России // Управление образованием: теория и практика Том 12. № 9 (2022).

2. Гаджиев Н. Г. Планирование и управление финансовыми ресурсами вуза в условиях модернизации системы высшего образования в Российской Федерации. Ж: Сибирская финансовая школа. 2015. № 1 (108). С. 131-134.

3. Гасаналиев А. Ш., Кадиев Г. И. Реформа высшего образования в современной России Ж: Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 3: Общественные науки (2025).

PROSPECTS FOR THE UNIVERSITY'S ECONOMIC DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF EDUCATIONAL SYSTEM REFORM

Nikiforova S., Fedorova A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Purpose: The field of higher education acts as a guarantor of stability and sustainability, supports the country's competitiveness in the global community, and is a key element of economic and social status. People's education can be considered an effective factor in economic growth [1]. Therefore, only with a high level of quality in education is there a high probability of intensifying the pace of social development.

This study is based on the trends towards the implementation of new systems and practices for the economic development of higher education institutions, the development of a system for managing changes in an unstable external environment, the need to minimize the negative consequences of reforms, and the prediction of high performance indicators for universities.

Key words: higher education reform, economic development, management of change

УДК 339.138
ГРНТИ 06.81.55

ШЕРИНГОВАЯ ЭКОНОМИКА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

А. А. Носенко[1], О. А. Посохова[2]

[1]ООО “Энерговыбор”
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена исследованию развития новой модели шеринговой экономики. С развитием цифровых платформ, увеличением экологического бремени утилизации товаров и упаковки, а также снижением ценности физических объектов среди поколения Z, модели совместного использования ресурсов, известные как экономика совместного потребления, приобретают все большее распространение. Эти модели характеризуются отказом от традиционной собственности в пользу временного доступа к товарам и услугам. В условиях цифровой трансформации шеринговая экономика получает ряд преимуществ. В текущих реалиях анализ основных типов практики совместного использования и оценка перспектив их будущего развития являются актуальными и востребованными как в теоретическом, так и в прикладном аспектах экономических исследований. Приведен анализ существующих шеринговых сервисов. Представлены особенности экономики совместного поведения и факторы, оказывающие влияние на нее.

шеринг, совместное потребление, рациональное потребление, потребительское поведение, цифровая трансформация

Экономическое развитие носит циклический характер, проявляясь не только в макроэкономической динамике, но и в трансформации моделей хозяйственного поведения домохозяйств и отдельных экономических субъектов. Изменения социально-экономической среды приводят к переосмыслению традиционных форм потребления и владения ресурсами, что находит отражение в эволюции повседневных экономических практик. Если в предыдущие исторические периоды доминировала тенденция к индивидуализации потребления и отказу от коллективных форм использования благ, то в современных условиях наблюдается рост интереса к альтернативным моделям, основанным на совместном доступе к ресурсам. Кроме того, в условиях финансовой и экономической нестабильности, возможность рационального использования и экономии средств в моменте времени становится более важной опцией, чем возможные преимущества от бессрочного владения определенным предметом в условиях неопределенности. В усло-

виях цифровой трансформации шеринговая экономика получает ряд преимуществ. Разнообразие и обилие товаров, используемых людьми в современной экономике, усугубляет проблему утилизации отходов в связи со значительным объемом, как упаковочно-транспортировочного материала, так и самих товаров. Кроме того, можно отметить такой фактор как тренд на осознанное потребление, который особенно популярен у молодого поколения.

Представители поколения Z (родившиеся 1995-2010 гг.) по определению консалтинговой компании MCKinsey рассматривают «потребление как доступ к чему-либо, но не обязательно владению» [1].

Однако, изменение потребительских привычек отмечают и в возрастной группе «40+» [2]. Активное развитие и использование сети Интернет и онлайн-платформ значительно упрощает коммуникацию и поиск нужных объектов, что служит толчком к развитию шеринговой экономики.

К определению шеринговой экономики зарубежные исследователи подходят многогранно.

Как отмечает Р. Белк, совместное потребление было частью человеческого поведения с древних времен, но совместное потребление и экономика совместного потребления – это концепции, появившиеся в эпоху Интернета. При всем разнообразии подходов к определению экономики совместного потребления, в исследованиях можно выделить два базовых элемента. Это использование цифровых каналов, прежде всего сетевых технологий, в качестве основного механизма взаимодействия между участниками и реализация обменных практик, направленных на расширение доступа к товарам и услугам

А. Сингх определил экономику совместного потребления как социально-экономическую модель, в которой люди готовы делиться своими «социальными» продуктами и услугами, фокусируясь как на социальных, так и на экономических компонентах концепции [3].

А. Сундарараджан определяет экономику совместного потребления как экономическую и бизнес-модель, в которой люди имеют свободный доступ к ресурсам, таким как товары или услуги, посредством аренды, обмена, лизинга или продажи. Такая модель часто приводит к экономии и сокращению отходов. Данный термин подчеркивает необходимость отказа от мышления, ориентированного на потребление, и вместо этого акцентирует внимание на важности продления срока службы вещей.

Ключевые факторы выделяемые в новой модели поведения потребителя:

1. Ранее основной причиной аренды была невозможность приобрести. Текущие же пользователи сервисов чаще не хотят загружать жизненное пространство, имеет другие приоритеты на траты (чем приобретение), и хотят быть экологически и этически более «дружелюбными».

2. Процесс аренды и завершения аренды стал намного проще благодаря развитию технологий [4].

По сути, шеринг приобрел форму автоматизированной (онлайн) аренды. В 2011 г. журнал Time назвал шеринг одной из десяти идей, которые изменят мир [5].

И нужно заметить, что по статистическим исследованиям объем мирового рынка шеринговой экономики ежегодно увеличивается [6].

В последние годы рынок шеринга в России растет более чем на 20-40 % в год, а объем рынка превышает 4,5 млрд рублей [7]. На глобальном рынке согласно аналитике PWC прогнозировался значительный рост экономики шеринга более чем в 20 раз за десятилетие с 2015 года [4]. Экономика совместного потребления меняет не только экономические модели, но и потребительское поведение. Главная идея шеринга заключается в том, чтобы платить не за обладание, а за реальное использование.

Рассмотрим примеры шеринга в современных условиях:

Хоумшеринг – сдача квартир, домов, палаток и иного жилья для путешественников или гостей. Зарубежный хоумшеринг “Airbnb” начинался с идеи поставить в гостиной надувные матрасы, а по данным на 2025 год занимает 28 % рынка онлайн бронирования, опережая сервис booking.com (5.5 %). Аналог в России – «Суточно.ру». По данным журнала Forbes, доля «Суточно.ру» на TravelTech-рынке составляет 11 %, сервис занимает третье место после «Островка» (29 %) и «Яндекс Путешествий» (23 %) [8].

Коливинг – совместное проживание, где люди не только делят стоимость жилья, но и общаются, развиваются вместе. Обычно жильцы объединены общими интересами и это главное отличие от идеи коммунальных квартир. Данный формат потребительских отношений больше подходит под комьюнити. «Common» – международная коливинг-сеть, в России популярность в Москве приобретают «Colife» и «Свои».

Каучсерфинг – возможность бесплатного проживания у местных жителей во время путешествий. Популярное направление шеринга жилья с целью культурного обмена, общения, разделения домашних обязанностей.

Одна из самых известных платформ в мире – «Couchsurfing.com», из современных платформ можно отметить: «Trustroots», «BeWelcome», «Warmshowers». В России данное направление получило поддержку в социальных сетях, где можно найти группы «Каучсерфинг и путешествия».

Хаусситинг – пока хозяева в отъезде, можно бесплатно пожить в доме и присмотреть за питомцами – на международных платформах «TrustedHousesitters.com» и «MindMyHouse.com» или в России найти объявления на «Авито», «Профи.ру».

Карпулинг или райдшеринг – водитель берет попутчиков и экономит на бензине. Сервис «BlaBlaCar» известен практически во всем мире, в том числе и в России. Для ежедневных маршрутов актуален сервис «Довезу!».

Коворкинг – место для удаленной работы со всеми удобствами. В России активно функционируют платформы «GrowUp», «Workki».

Шеринг-платформы для самозанятых – люди могут предлагать услуги любого формата. Легко найти исполнителя под любую задачу. Международные платформы – «Upwork» и «Fiverr», в России популярны «Profi.ru», «Яндекс Услуги», «Workzilla».

Шеринг-платформы для образования – это возможность учиться у лучших преподавателей мира, не выходя из дома. Международные платформы – «Coursera», в России – «Лекториум», «Универсариум».

Дресс-кроссинг – обмен одеждой, чтобы не покупать новые вещи, а использовать те, которые уже есть. Пример осознанного потребления в США – «Swap.com». В России данной теме посвящен проект «Svalka», где не только обмениваются одеждой и вещами, но и делают соответствующие вечеринки.

Краудфандинг – пример P2P интеграции (People To People), где можно помочь стартовать проекту: написание книги, стартап или сьемка фильма. Международные платформы – «Kickstarter», «Indiegogo» – поддерживают проекты со всего мира. Российские платформы – «Boomstarter», «Planeta.ru».

Отдельно хочется выделить открытие пунктов проката детских вещей и предметов для новорожденных в Санкт-Петербурге на базе Центров социальной помощи семье и детям. Значительная часть граждан с их помощью имеет возможность бесплатно взять ряд товаров в аренду. Кроме того, информация об этой возможности регулярно и весьма активно распространяется через детские сады и школы Санкт-Петербурга. Предоставление детских товаров во временное пользование на безвозмездной основе следует

рассматривать не только как инструмент социальной поддержки семей, но и как фактор формирования устойчивых моделей шерингового потребления. Так как регулярное взаимодействие с подобными практиками способствует адаптации потребителей к формату аренды вместо владения.

Экономика совместного потребления – это сложная и многогранная концепция, оказывающая значительное влияние сразу на множество секторов экономики. С позиции концепции устойчивого развития экономика совместного потребления выступает механизмом трансформации устоявшихся подходов к потреблению, производству и владению экономических благ. Производство и потребление тесно связано с экологическими издержками, такими как образование мусора, выбросы углекислого газа и водопотребление. Эти издержки в конечном итоге способствуют критическому ухудшению как в части климата, так и в части загрязнения значительных территорий.

Необходимо отметить, что технологический прогресс, связанный с расширением цифровой экономики и использование мобильных устройств среди поколения Z упрощает процесс общения, предоставляя доступ к товарам без необходимости их владения.

Кроме того, особенно в части крупных городов нужно выделить 2 причины, которые должны способствовать развитию шеринга: рост доли малогабаритного жилья [9] и становление рынка коммерческого хранения вещей способствует переосмыслению возможностей хранений из бесплатной опции в ресурсоемкий процесс, обладающий ценой.

В процессе исследования потребительского поведения в условиях развития новой модели шеринговой экономики необходимо выделить следующие факторы, влияющие на потребительский выбор шеринга:

1. Акцент на удобство для людей. Теперь клиент – это в первую очередь пользователь, поэтому важным становится не упаковка, а удобство, скорость, качество сопутствующего сервиса. Сегодня не так важна марка автомобиля, сколько близость к месту локации и возможность бесплатной парковки.

2. Цифровизация для удобства потребления. Любой сервис работает через приложение или онлайн-платформу. На первый план выходит скорость и удобство в системе «здесь и сейчас».

3. Экологический фактор и экономия ресурсов. Шеринг увеличивает срок службы вещей и снижает производство новых. Что в свою очередь снижает вред для природы.

4. Рост доли малогабаритного жилья.

Тренд на совместное потребление набирает обороты: осознанное потребление становится не только популярным, но и является двигателем экономики. По-прежнему существует значительное количество проблем, как в сфере законодательного и финансового регулирования шеринговой экономики, так и в сфере безопасности.

В ходе проведенного исследования были рассмотрены основные виды шеринговых практик, получившие распространение в современной экономике, а также выявлены ключевые направления их дальнейшего развития. Анализ показал, что шеринговая экономика является многоаспектным явлением, охватывающим различные сферы потребления и основанном на использовании моделей временного доступа к товарам и услугам вместо традиционного владения.

Распространение шеринговых практик обусловлено совокупностью экономических, технологических и социальных факторов, включая цифровизацию, изменение потребительских предпочтений связанного не только с экономическими причинами, но и с трендом на разумное потребление.

Перспективы развития шеринговой экономики связаны с дальнейшей институционализацией данных практик, расширением спектра предоставляемых услуг, а также формированием устойчивых поведенческих установок у потребителей, ориентированных на использование формата совместного потребления. В данном контексте особое значение приобретает участие государства, которое, с одной стороны, способствует социальной поддержке населения, а с другой – формирует условия для распространения и закрепления шеринговых моделей в экономике.

Таким образом, шеринговая экономика может рассматриваться как значимое направление трансформации современных моделей потребления, требующее дальнейшего изучения с точки зрения экономической теории и практики, а также разработки рациональных механизмов регулирования и поддержки.

Список используемых источников

1. «True Gen»: Generation Z and its implications for companies. McKinsey // URL: https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/ourinsights/true-gen-generation-z-and-its-implications-for-companies (дата обращения: 17.01.2026).

2. Киреева Н. С., Завьялов Д. В., Завьялова Н. Б., Сагинова О. В. Трансформация шеринговой экономики в условиях пандемии COVID-19 // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11. № 2. С. 213-226.

3. Singh, A. A Social Marketing Framework for the Sharing Economy. Soc. Mark. Q. 2022, 28, 248–266. [Google Scholar, CrossRef].

4. Передай другому: что такое экономика шеринга //Официальный сайт РБК URL: https://trends.rbc.ru/trends/sharing/5e73fbc29a794707401b6532 (дата обращения: 17.01.2026).

5. Walsh B. Sharing. Today's Smart Choice: Don't Own. Share / 10 Ideas That Will Change the World // Time. 2011. 17 марта // URL: https://content.time.com/ time/specials/packages/article/0,28804,2059521_2059717,00.html (дата обращения: 17.01.2026).

6. Свинова Е. В России набирает популярность совместное потребление. URL: https://rg.ru/2023/09/24/princip-deleniia.html (дата обращения: 17.01.2026).

7. Аналитики рассказали о росте объема рынка шеринговых сервисов в России // Известия URL: //https://iz.ru/1804369/2024-12-10/analitiki-rasskazali-o-roste-obema-rynka-seringovyh-servisov-v-rossii

8. Цвиркун А. Pre-IPO фонд «ВИМ Инвестиций» стал совладельцем сервиса аренды жилья «Суточно.ру» //Официальный сайт FORBES URL: https://www.forbes.ru/svoi-biznes/523000-pre-ipo-fond-vim-investicij-stal-sovladel-cem-servisa-arendy-zil-a-sutocno-ru (дата обращения: 17.01.2026).

9. Микроквартиры занимают 14 % от общего числа предложений на рынке жилья // Официальный сайт RG URL https://rg.ru/2025/03/07/mikrokvartiry-zanimaiut-14-ot-obshchego-chisla-predlozhenij-na-rynke-zhilia.html?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 17.01.2026).

Статья представлена заведующим кафедрой ЭД СПбГУТ, кандидатом экономических наук, доцентом О. В. Калимуллиной.

THE SHARING ECONOMY IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION

[1]Nosenko A., [2]Posokhova O.
[1]Energovybor LLC
[2]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

With the development of digital platforms, the increasing environmental burden of recycling goods and packaging, and the declining value of physical objects among Generation Z, resource sharing models known as the sharing economy are becoming increasingly widespread. These models are characterized by a rejection of traditional ownership in favor of temporary access to goods and services. In the context of digital transformation, the sharing economy is gaining a number of advantages.

Key words: sharing, collaborative consumption, sustainable consumption, consumer behavior, digital transformation

УДК 316.324.8
ГРНТИ 18.11.00

ИСКУССТВО В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЩЕСТВЕ

Д. Б. Пучков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Искусство в информационном обществе переживает значительные изменения. Развивается технический арсенал художественного творчества, появляются новые течения и новые виды искусства. Развиваются технологии, облегчающие зрителям знакомство с художественными произведениями. Появляются новые организационные возможности, связанные с обучением, привлечением финансирования, коммуникацией и социальной самоорганизацией в сфере художественной деятельности. Однако заметны и некоторые проблемы: коммерциализация искусства, широкое распространение массовой продукции невысокого качества, угроза размывания творческих и гуманистических компонентов искусства.

современное искусство, постиндустриальное общество, коммерциализация искусства, китч

Искусство в информационном обществе переживает значительные изменения. Прежде всего, развивается технический арсенал художественного творчества. Использование компьютерных спецэффектов в кинематографе или применение аудиотехники при исполнении музыкальных произведений давно уже стали привычными явлениями. Однако современные технологии идут намного дальше: они способны придавать одному музыкальному инструменту тембр другого, позволяют писать картины прямо по экрану монитора, помогают кинорежиссерам создавать едва ли не целые миры, нарисованные на компьютере, и т. д. Все это во многих случаях расширяет возможности художников и экономит их труд. Зачастую технический прогресс облегчает занятие творчеством для начинающих художников. Сегодня почти каждый человек может попробовать себя в роли автора художественной фотографии или видеосъемки. Для этого не нужно, как раньше, владеть сложными техниками проявки фотографий и управления фото- и видеоаппаратурой.

Появляются новые течения и новые виды искусства, использующие современные технологии. Например, цифровая живопись, где художник с помощью специального приспособления рисует прямо по экрану компьютера.

Развиваются технологии, облегчающие зрителям знакомство с произведениями искусства. Благодаря чудесам современной техники мы можем прямо из дома послушать концерты прославленных музыкантов или совершить видеоэкскурсию по ведущим музеям мира. Использование интернет-технологий позволяет художникам и арт-менеджерам распространять информацию о своей деятельности, а зрителям – узнавать о событиях из мира искусства.

Появляются новые организационные возможности, связанные с обучением, привлечением финансирования, коммуникацией и социальной самоорганизацией в сфере художественной деятельности. С помощью интернета можно, не выходя из дома, посмотреть видеоуроки живописи или игры на гитаре. Благодаря социальным сетям появляются дополнительные возможности для общения между деятелями искусства и их аудиторией.

Сегодня технологии проникают и в сам процесс творчества. Не секрет, например, что некоторые современные композиторы при написании своих произведений используют заготовки, сгенерированные специальными компьютерными программами. Аналогичные приемы используются в живописи и в некоторых других видах искусства. Правда, здесь закономерно возникает вопрос, до каких пределов возможно подобное «делегирование полномочий» от живого художника к машине без потери творческого характера такой деятельности?

Таким образом, перед искусством информационного общества открывается множество новых возможностей. Однако в то же время заметны и некоторые проблемы. Одной из них является коммерциализация искусства, то есть проникновение коммерческих принципов в сферу художественной деятельности. Все чаще произведения искусства рассматриваются как товар. А товар, как известно, должен хорошо продаваться. С этой точки зрения, например, успешным фильмом часто признается тот фильм, который собрал в прокате большую кассу.

Однако правильно ли оценивать искусство, главным образом, по коммерческим критериям? Вероятно, нет. Помимо коммерческой составляющей, в искусстве должны присутствовать эстетическое измерение, художественная правда, отсылка к моральным ценностям. Без этого трудно назвать ту или иную продукцию произведением искусства – во всяком случае, хо-

рошим произведением. Такого рода посредственная продукция едва ли поможет зрителям в решении серьезных духовных проблем – например, в преодолении ощущения бессмысленности существования, от которого страдают многие наши современники [1, с. 156].

Существует устоявшееся мнение, что искусство неразрывно связано с творческой свободой художника. Если же верно, что одним из проявлений свободы выступает бескорыстие [2, с. 93], тогда «стремление заработать» заведомо находится в весьма напряженных отношениях со свободой творчества.

Как отмечает Ф. Уэбстер, перевод деятельности художников и учреждений культуры на коммерческие рельсы приводит к серьезным изменениям в их работе. С одной стороны, подобная коммерциализация заставляет деятелей культуры и искусства больше учитывать интересы публики, что является отчасти положительным моментом. С другой стороны, это приводит к преобладанию таких произведений, которые либо привлекательны для широкой публики и поэтому позволяют собрать большую кассу, либо интересны для спонсоров. А с этим связано уже немало отрицательных моментов. «Рыночный подход может, конечно, способствовать развитию воображения и новаторского подхода, но все чаще музей привлекает посетителей с помощью кафе, магазинов и экзотических выставок, что едва ли повышает качество предлагаемой информации и делает ее восприятие более глубоким», – пишет Уэбстер [3, с. 196]. Что же касается спонсоров, то они обычно являются представителями коммерческих компаний и вынуждены учитывать прагматические соображения – например, PR-стратегии своих компаний. Данное обстоятельство накладывает отпечаток на содержание спонсируемых ими художественных произведений: «Для всего неординарного и требующего воображения... нелегко получить поддержку: Агата Кристи – это пожалуйста, но Дарио Фо – увольте» [3, с. 196].

Сторонники коммерческого подхода могли бы возразить, что финансово-экономическая сторона также важна для искусства. Ведь многим художникам приходится зарабатывать на жизнь своим творчеством, и это заставляет их заботиться о коммерческой успешности своих работ. Кроме того, в некоторых видах искусства, таких как кинематограф, создание произведений зачастую связано с большими финансовыми вложениями, которые приходится окупать. С этими возражениями приходится отчасти согласиться. В подобных случаях коммерческая составляющая искусства оказывается необходимой. Вероятно, в таких ситуациях оптимальным вариантом

будет нахождение баланса между коммерческой и творческой сторонами искусства.

Другой проблемой искусства нашего времени является широкое распространение массовой продукции невысокого качества. Одной из причин этому служит уже упомянутая коммерциализация искусства. Другой причиной является, вероятно, тот факт, что сегодня искусство довольно часто ориентируется на широкую аудиторию, а значит, должно подстраиваться под вкусы массового зрителя. В этом контексте можно вспомнить утверждение Жана Бодрийяра о том, что в современном обществе все большее распространение получает такое явление, как китч [4, с. 144]. Китч – это шаблонная продукция, сделанная «на скорую руку». Примерами китча являются товары из сувенирных лавок для туристов. В китче отсутствуют оригинальность и творческий поиск, все упрощено до уровня понимания обывателя. Зато китч дешев в производстве и хорошо продается.

В этой связи уместно заметить, что, несмотря на бурное развитие своего технического арсенала, искусство наших дней не демонстрирует особого прогресса по сравнению с искусством прошлого. Едва ли мы скажем, что современные писатели превзошли Шекспира, а современные композиторы возвысились над Бахом и Моцартом. Ведь помимо технической оснащенности в искусстве важны художественная правда, моральное содержание, эстетическое совершенство. Технический прогресс сам по себе не гарантирует прогресса во всех перечисленных компонентах. «В целом, интеллектуальное содержание искусства сократилось, что само по себе не может радовать, однако в исторической перспективе объяснимо. Позволительно надеяться, что на заре информационного общества в результате сильных перемен, охвативших все стороны жизни, искусство запасается новым чувственным материалом для дальнейшей работы», – отмечает П. Ю. Нешитов [5, с. 44]. Оправдает ли современное искусство возложенные на него надежды – покажет время.

Список используемых источников

1 Пучков Д. Б. Идея индивидуального бытия человека и проблема абсурда // Вестник ЛГУ им. А. С. Пушкина. 2009. № 3. Т. 1, серия Философия. С. 156 – 163.

2. Егоров А. Г. Истина и свобода // Поиск истины и правда жизни в пространстве современной культуры: сборник материалов XV ежегодного теоретического семинара по проблемам истины. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2023. С. 91-95.

3. Уэбстер Ф. Теории информационного общества. М.: Аспект Пресс, 2004. 400 с.

4. Бодрийяр Ж. Общество потребления. Его мифы и структура. М.: Республика; Культурная революция, 2006. 269 с.

5. Нешитов П. Ю. Информационное общество: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2020. 56 с.

ART IN THE INFORMATION SOCIETY

Pouchkov D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Art in the information society is undergoing significant changes. The technical arsenal of artistic creativity is evolving, new trends and new art forms are emerging. Technologies are advancing, making it easier for the audience to experience works of art. New organizational opportunities are emerging in the areas of education, funding, communication, and social self-organization in the artistic field. However, certain challenges are also noticeable: the commercialization of art, the widespread distribution of low-quality mass-produced products, and the threat of erosion of the creative and humanistic components of art.

Key words: contemporary art, post-industrial society, commercialization of art, kitsch

УДК 504.055
ГРНТИ 87.55.33

ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ КОРРЕКТНОСТЬ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В. И. Стурман

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Обобщены результаты работ кафедры экологической безопасности телекоммуникаций СПбГУТ по картографированию электромагнитного загрязнения урбанизированных территорий. Изложено содержание понятия географической корректности карт, особенности его применения в случае картографирования техногенных электромагнитных полей, а также принципы и методические подходы, обеспечивающие ее достижение. Показано, что исчерпывающим фактором географической корректности в случае картографирования электромагнитных полей является репрезентативность точек и моментов выполнения измерений.

географическая корректность карт, электромагнитное загрязнение, урбанизированные территории

Понятие географической корректности экологических карт было предложено автором в 1995 г. [1] и означает соответствие локализации картографируемых объектов и характеристик их пространственной изменчивости и временной динамики, на карте и на картографируемой территории. При кажущейся очевидности этого, достижение географической корректности карт, в частности экологического содержания, сопряжено с преодолением ряда объективных и субъективных трудностей. При первоначальном введении понятия географической корректности [1] было определено, что географически корректное картографическое представление данных о загрязнении окружающей среды может быть осуществлено на основе следующих принципов:

– антропоцентризм (если речь идет о нарушенной, в т.ч. урбанизированной среде) или биоцентризм (для природных ландшафтов);
– документальность (метрологическая обоснованность исходных данных и однозначность выводов в соответствии с требованиями, принятыми в законодательных и нормативно-методических документах);

– комплексность (учет всей системы взаимосвязей между организмом и окружающей его средой);
– динамичность (учет динамики взаимодействия антропогенной нагрузки с природной средой, что предполагает необходимость специального природно-территориального районирования, с однородностью используемых территориальных единиц по условиям переноса и трансформации загрязнений);
– сомасштабность (т.е. соответствие разрешающей способности карты территориальным рамкам проявления отображаемого явления или процесса);
– приоритет специфического содержания (по отношению к особенностям и возможностям применяемых для создания карт технических средств, включая выбор способов картографических изображений, обеспечивающих максимальную информационную насыщенность при минимальной графической нагрузке).

Особенности электромагнитного загрязнения окружающей среды как объекта картографирования связаны с практически мгновенным характером его распространения и вытекающим отсюда отсутствием фактора инерционности. Для электромагнитного загрязнения неважны факторы переноса загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере, но исчерпывающим фактором является размещение источников (систем энергоснабжения, электротехнических и в т.ч. радиотехнических устройств). Однако размещение источников электромагнитных полей, как и любых техногенных объектов, сильнейшим образом зависит от сложившихся ранее природных и техногенных особенностей территории.

Поэтому применительно к задачам картографирования электромагнитного загрязнения географическая корректность означает репрезентативность точек пространства и моментов времени, выбранных для выполнения измерений. Выбор точек пространства включает, прежде всего, учет требований МР 4.3.0177-20.4.3 [2] (принцип документальности создаваемых карт), однако это (метрологический аспект репрезентативности) – необходимое, но не достаточное условие. Не менее важен методический аспект репрезентативности – выбор точки пространства и момента времени проведения измерений, для обеспечения их репрезентативности (принцип динамичности). В пространственном отношении репрезентативность обеспечивается учетом дифференциации урбанизированных территорий по характеру их использования и застройки. Для этого измерения выполня-

ются в однородных в этом отношении точках, а число таких точек для каждого типа использования и застройки территории должно быть достаточно для последующего расчета статистически достоверных обобщающих характеристик. Обычно основной результат картографирования – пространственное распределение характеристик магнитной индукции – показывается посредством изолиний (принцип сомасштабности). При этом различия в характере использования и застройки территорий учитываются при выполнении интерполяции между точками измерения. Изолинии на карте по возможности приурочиваются к границам функциональных зон (географическая интерполяция [3]).

Особое внимание уделяется наиболее мощным источникам электромагнитных полей – высоковольтным линиям, вблизи которых выполняются серии измерений по профилям. Опыт работ в ряде городов показал также, что важную роль в формировании пространственного распределения электромагнитных полей играют аномалии – нетипичные для данных типов использования земель и застройки повышенные значения. Аномалии выявляются только при натурных измерениях и могут быть обусловлены:

– проложенными под землей кабелями, что обнаруживается только в процессе измерений, по резко выраженному росту значений с приближением к поверхности земли (грунтовые аномалии);
– провода и кабели воздушной прокладки, наблюдаемые визуально, причем их значимость проявляется по ощутимому росту показателей при приближении к ним (воздушные аномалии);
– неустановленные факторы, которыми с наибольшей вероятностью могут быть мощные электроприборы и оборудование в ближайших зданиях (аномалии неясного происхождения, выявляемые по резко повышенным показаниям прибора).

Поскольку аномалии всех указанных типов незначительны по площади (метры, изредка – десятки метров), на карте они показываются способом значков. Повышенные значения вдоль высоковольтных линий показываются линейными знаками.

Во временном отношении типичность обеспечивается выполнением измерений только в период наибольшей активности населения, предприятий и транспорта. Это означает измерения в утренние, дневные и вечерние часы, в рабочие дни, когда нагрузка на системы энергоснабжения, электрическое оборудование и приборы максимальна.

Наши последние исследования техногенных электромагнитных полей, выполненные в 2025 г. в центральных частях городов Мурманск и Псков, выполнялись с учетом всего предшествующего опыта и наглядно показали зависимость пространственного распределения электромагнитных полей от природных и техногенных ландшафтов соответствующих городов.

Список используемых источников

1. Стурман В. И. Основы экологического картографирования: учебное пособие. Ижевск: Изд-во Удм. ун-та, 1995. 221 с.

2. МР 4.3.0177-20. 4.3. Методы контроля. Физические факторы. Методика измерения электромагнитных полей промышленной частоты 50 Гц на селитебной территории. Методические рекомендации.

3. Берлянт А. М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240 с.

GEOGRAPHICAL CORRECTNESS OF ELECTROMAGNETIC FIELD MAPPING

Sturman V.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The results of the Department of Environmental Safety of Telecommunications of St. Petersburg State University of Telecommunications on mapping of electromagnetic pollution of urbanized territories are summarized. The content of the concept of geographical correctness of maps, the features of its application in the case of mapping of man-made electromagnetic fields, and the principles and methodological approaches that ensure its achievement are presented. It has been shown that the representative nature of the measurement points and moments is the sole factor of geographical correctness in the case of mapping electromagnetic fields.

Key words: geographical correctness of maps, electromagnetic pollution, urbanized territories

УДК 378.22
ГРНТИ 14.35.07

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ПОРТРЕТ СПЕЦИАЛИСТА В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ

И. Н. Федоренко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена исследованию перспектив успешного трудоустройства российского специалиста, способного расширять возможности инфраструктуры и услуг информационно-коммуникационных технологий на основе профессиональных компетенций. Проведен опрос с целью выявить уровень осведомленности будущих инженеров о профессиональной карьере в отраслях экономики. Разработаны рекомендации для студентов технического вуза по созданию профессионального портрета специалиста отрасли с наименованием Деятельность в области информации и связи при освоении экономических дисциплин

информационно-коммуникационные технологии, вакансии, резюме, отрасли экономики, профессиональный портрет, цифровая экосистема, экономика данных

Современный этап реализации национального проекта «Экономика данных и цифровая трансформация государства» (далее – «Экономика данных»), связан с поддержкой российских цифровых разработок, способствует укреплению кибербезопасности и подготовке специалистов в сфере информационных технологий [1]. Профессии, связанные с интенсивным использованием информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) востребованы во всех отраслях экономики, обеспечивая работоспособность и развитие информационно-технической инфраструктуры [2].

Обобщение профессиональных характеристик специалистов по работе с информационными сетями, разработчиков программного обеспечения (ПО), представляется актуальной задачей при изучении в техническом вузе дисциплины Экономика отрасли. Объект исследования – вакансии в области ИКТ (ИКТ-специалистов) и их резюме на платформе HeadHunter. Предмет – профессиональные компетенции претендентов, сформированные на основе статистических данных. Цель – создание профессионального портрета российского специалиста в области информационных технологий, на основе требований работодателей, представляющих различные сектора

экономики. Методология и методы: научная абстракция, экономико-статистический анализ, опрос. Профессиональные компетенции формируются на основе научных исследований в области сетей связи, которые подробно изучены группой ученых – А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, М. А. Маколкина, А. И. Парамонов, А. И. Выборнова, Р. Я. Пирмагомедов [3]. Очень важной квалификационной характеристикой, для работника является умение вовремя определить начало кризиса и предотвратить его влияние на деятельность компании в целях обеспечения безопасности [4].

Проведен анализ – рейтинг российских интернет-площадок, в основу которого лег показатель месячной посещаемости ресурса по поиску работы, таблица 1.

ТАБЛИЦА1. Рейтинг российских веб-сайтов по поиску работы [5]

Название веб-портала	Количество посещений на 01.12.2025, млн. чел.
hh.ru (HeadHunter)	45,2
Habr Career	8,7
Superjob.ru	7,1
Работа.ру (Rabota.ru)	5,8
Зарплата.ру (Zarplata.ru)	5,8
Avito Работа	2,9

Таким образом, HeadHunter является абсолютным лидером по посещаемости среди российских сайтов, что подтверждает его репрезентативность как источника данных для анализа рынка труда.

В декабре 2025 был проведен опрос студентов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.проф. М. А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ), очной формы обучения, изучающих дисциплину Экономика отрасли, 112 человек, с использованием Google формы. Цель – выявить уровень осведомленности будущих инженеров о профессиональной карьере в отраслях экономики. Респонденты, сформировали выборочный список ИКТ-профессий. Статистка данных о требованиях к образованию представлена в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Требования к уровню образования ИКТ- специалистов [5]

Название профессии / число проанализированных вакансий	Уровень образования					
	Высшее		Среднее профессиональное		Не требуется или не указано	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Data Scientist (200)	175	87,5	10	15,0	15	7,5
Backend-разработчик (350)	280	80,0	35	35,0	35	10,0
DevOps-инженер (150)	120	80,0	15	10,0	15	10,0
Кибербезопасность (120)	108	90,0	6	5,0	6	5,0
Системный аналитик (180)	162	90,0	9	5,0	9	5,0
Среднее значение	-	85,5	-	7,0	-	7,5

Для большинства вакансий в высокотехнологичных ИКТ-специальностях обязательным требованием является наличие высшего образования. Особенно высок этот показатель для аналитических и security-профессий (90 %). Необходимый уровень заработной платы, предлагаемый работодателями указан в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Предложение заработной платы для ИКТ- специалистов [5]

Название профессии	Число вакансий для анализа	Количество вакансий в наибольшем зарплатном интервале		
		в шт.	в % к общему числу	Интервал в наибольшем числе вакансий, тыс. руб
Data Scientist	200	70	35	150 000 – 220 000
Backend-разработчик	35	105	30	120 000 – 180 000
DevOps-инженер	150	45	30	140 000 – 210 000
Кибербезопасность	120	48	40	130 000 – 190 000
Системный аналитик	180	72	40	110 000 – 160 000

Анализ показывает высокий уровень доходов в ИКТ-сфере. Наиболее «дорогими» профессиями являются Data Scientist и DevOps-инженер. Требуемый опыт при найме, представлен в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Требуемый опыт работы при найме ИКТ-специалистов [5]

Название профессии	Число вакансий для анализа	Опыт работы (значения указаны в процентах)			
		1-3	3-6	Больше 6	Без опыта
Data Scientist	200	45	36	15	5
Backend-разработчик	350	50	30	15	5
DevOps-инженер	150	30	50	18	2
Кибербезопасность	120	40	40	18	2
Системный аналитик	180	55	30	10	5

Наибольший спрос на рынке труда наблюдается на специалистов с опытом работы от 1 до 3 лет (мидл-уровень), особенно для разработчиков и аналитиков. Для DevOps-инженеров и специалистов по кибербезопасности чаще требуются более опытные кандидаты (3-6 лет). Вакансий для начинающих специалистов (без опыта) очень мало (2-5 %), что создает сложности для входа в профессию. Соотношение полов претендентов показано в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5. Пол кандидатов на вакантные рабочие [5]

Название профессии	Пол кандидатов				
	Число резюме для анализа	Мужской		Женский	
		шт.	%	шт.	%
Data Scientist	300	240	80	60	20
Backend-разработчик	500	425	85	75	15
DevOps-инженер	200	190	95	10	5
Кибербезопасность	150	135	90	15	10
Системный аналитик	250	150	60	100	40

Таким образом, наиболее востребованы кандидаты мужского пола. Распределение кандидатов по возрастам отражено в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6. Возраст кандидатов на вакантные рабочие места [5]

Название профессии	Число вакансий для анализа	Возраст кандидатов (значения в процентах)				
		18-30	30-40	40-50	50-60	Старше 60
Data Scientist	200	65	30	4	1	0
Backend-разработчик	350	60	30	8	2	0
DevOps-инженер	150	40	45	12	3	0
Кибербезопасность	120	35	50	13	2	0
Системный аналитик	180	40	40	15	5	0

Для профессий, связанных с разработкой и базами данных, востребованность молодежи до 30 лет. Для инфраструктурных (DevOps), пик востребованности смещен к категории 30-40 лет. На завершающем этапе исследования подготовлен словесный формат портрета, таблица 7.

ТАБЛИЦА 7. Профессиональный портрет специалиста в области и нформационно-коммуникационных технологий для отраслей экономики [5]

Признак	Значения	Комментарий
Возраст	В %:18-30 лет – 50,30-40 лет – 35,40-50 лет – 10,50-60 лет – 2 Более 60 лет 0 –	Отрасль динамична и молода. Основной спрос на специалистов до 40 лет
Пол	В %: мужской – 80, женский –20	Мужчины более востребованы
Ключевые навыки (10 компетенций)	Python, SQL, Linux, Git Docker / Kubernetes, английский язык (B1+), работа в команде (Teamwork), гибкие методологии (Agile/Scrum), работа с большими данными, знание облачных платформ (AWS/Yandex Cloud)	Сочетание hard skills (языки, инструменты) и soft skills (коммуникация, английский) обязательно. DevOps-стэк и облачные технологии в топе
Средний уровень заработной платы	120 000 – 180 000 руб (наиболее частый интервал)	Высокий уровень дохода
Требования к опыту работы	1-3 года – основной, от 3-6 лет требуется для инфраструктурных и security-ролей	Рынок испытывает дефицит mid/senior-специалистов. Entry-level позиций мало

Признак	Значения	Комментарий
Регионы, в которых востребованы работники	1. Москва 2. Санкт-Петербург 3. Московская область, Татарстан	Высокая географическая концентрация в двух столицах и немногочисленных ИТ-кластерах
Отрасли экономики с наибольшим спросом	1. IT-услуги / Разработка ПО 2. Финансовый сектор 3. Телекоммуникации 4. Ритейл / E-commerce 5. Государственный сектор	ИТ-специалисты нужны как в профильной IT-индустрии, так и во всех секторах, проходящих цифровизацию

Таким образом, формирование профессионального портрета ИКТ-специалиста, студентами технических направлений, на практических занятиях по дисциплине Экономика отрасли (кейс-метод) и дистанционные технологии дают возможность проводить анализ требований работодателей в условиях реального времени [6]. Навыки, связанные с инфокоммуникационными системами, а также кросс-функциональные компетенции, для работы с большими данными в цифровой экосистеме, это основа успешного трудоустройства в различных секторах экономики.

Список использованных источников

1. Официальный сайт Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: https: //www.https://digital.gov.ru/ ru/events/48369/ (дата обращения: 30.01.2026).

2. Шестова Е. П. Особенности рынка труда IT-специалистов в российской экономике / Е. П. Шестова // Экономика труда. 2024. Т. 11, № 3. С. 349-360.

3. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В., Маколкина М. А., Парамонов А. И., Выборнова А. И., Пирмагомедов Р. Я. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 3. С. 1–14.

4. Федоренко И. Н. Оценка кризисных ситуаций как обеспечение экономической безопасности эмитентов // Эффективное антикризисное управление. 2014. № 4 (85). С. 82 – 85.

5. Портал по поиску работы HeadHunter (HH) // HH. URL: https://hh.ru/ (дата обращения: 01.12.2025).

6. Федоренко И. Н. Технологии дистанционного обучения по дисциплинам экономического профиля для реализации инклюзивного образования. – Текст: непосредственный // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 4. С. 148-153.

PROFESSIONAL PROFILE OF AN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY SPECIALIST FOR ECONOMIC SECTORS

Fedorenko I.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the study of the prospects for successful employment of a Russian specialist who is able to expand the capabilities of the infrastructure and services of information and communication technologies based on professional competencies. A survey was conducted to identify the level of awareness of future engineers about their professional careers in various sectors of the economy. The article provides recommendations for students of a technical university on creating a professional portrait of a specialist in the field of information and communication activities while studying economics.

Key words: information and communication technologies, vacancies, resumes, economic sectors, professional profile, digital ecosystem, and data economy

УДК 303.687
ГРНТИ 15.81.25

ГЕЙМИФИКАЦИЯ И ИГРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНАМ ГУМАНИТАРНОГО ЦИКЛА

С. И. Хитрин, И. Ю. Хитрина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Падение интереса студентов к традиционным формам обучения ставит перед преподавателями вузов задачу поиска новых средств и методов вовлечения студентов в активный учебный процесс. Одним из таких инструментов является геймификация. Сочетание игровых технологий и геймификации в преподавании гуманитарных дисциплин способствует вовлечению студентов в учебный процесс и стимулированию желаемого поведения. Будучи инструментом управления учебной деятельностью со стороны преподавателя, геймификация в сочетании с игровыми технологиями может стать инструментом самоуправления и саморазвития студентов.

геймификация, игровые технологии обучения, внутренняя и внешняя мотивация

Тема геймификации образования становится все более актуальной и популярной среди специалистов в области высшего образования. В геймификации преподаватели вузов видят средство решения проблемы вовлечения студентов в учебный процесс. Для данной тенденции имеется несколько оснований. Главное – стремительное развитие информационно-коммуникационных технологий, цифровизации всех областей жизнедеятельности человека и рост объема информации, доступной для пользователей сети интернет. Становление современных студентов пришлось на время, когда цифровые технологии, социальные сети и компьютерные игры стали элементом повседневной жизни. В связи с этим в работах, посвященных геймификации, часто называется второе основание для ее применения в образовании – специфические особенности поколения Z, к которому принадлежит большая часть современного студенчества: клиповое мышление, зависимость от гаджетов, привычка получать информацию быстро, в готовом, сжатом виде из интернет-источников [1]. Поколение Z часто называют «игровым», поскольку компьютерные игры сопровождают представителей этого поколения с детских лет. На фоне этих двух оснований легко объяснить падение интереса студентов к традиционным формам

обучения. Современному преподавателю вуза трудно соревноваться с интернетом и нейросетями, как по обилию, так и по форме подачи информации. А студентам, привыкшим к информации, упакованной в привлекательную обложку, не требующей больших усилий для ее получения и обработки, трудно и неинтересно слушать лекции или делать анализ многочисленных рекомендованных источников.

В целом ряде научных работ указывается, что геймификация образования может способствовать решению задач активизации учебной деятельности и вовлечения студентов в учебный процесс [1, 2, 4, 5].

Считается, что геймификация – достаточно молодая тенденция развития образования. Вместе с тем игровой подход в обучении известен достаточно давно. В советской педагогике игра считалась самым эффективным средством обучения в детском возрасте. Игру, как активный метод обучения, рекомендовали использовать в школе и вузе и даже при обучении взрослых. О. В. Орлова и В. Н. Титова, объясняя причины обращения педагогов к геймификации, справедливо ссылаются на наличие у человека естественной потребности в игре [3].

Термин «геймификация» чаще используется в контексте применения принципов и механизмов компьютерных игр для образовательных целей. Анализ определений геймификации тем не менее, предполагает более широкое толкование этого понятия. Обобщая представленные в разных работах определения [2, 3, 4, 5], можно сказать, что геймификация – это инструмент изменения традиционного процесса деятельности (в данном случае учения) с помощью игровых элементов, с целью вовлечения в осуществляемую деятельность и изменение привычного поведения и мышления участников. Таким образом, геймификация может использоваться не только для обучения, но и для труда и различных прикладных аспектов трудовой деятельности.

Применение геймификации в образовательном процессе в вузе позволяет использовать игру в качестве модели будущей профессиональной деятельности, давая возможность получить собственный опыт в безопасной ситуации, где не возбраняется делать и исправлять ошибки, и вдобавок получать удовольствие от процесса. Анализируя отличие геймификации от игровой технологии обучения, А. Н. Коберник и И. И. Осадченко подчеркивают, что участник геймифицированного учебного процесса не столько играет, сколько обучается по правилам игры [4]. То есть при использовании

геймификации содержание учебного процесса остается неизменным, а форма его осуществления подчиняется игровым принципам.

Вербах и Хантер выделяет три составляющие геймификации. Это игровые динамики (ограничения, эмоции, повествование, продвижения, отношения), игровые механики (задания, соревнования, вознаграждения, обратная связь) и неигровые контексты (экспериментирование, освоение пространства возможностей, результаты) [5]. Неигровой контекст – это и есть применительно к образованию учебная деятельность. Геймификация осуществляется за счет первых двух элементов, трансформирующих учебную деятельность в увлекательный игровой процесс. Конкретные формы, которые принимают механики и динамики, образуют компоненты или элементы игры. Именно они позволяют придать учебной деятельности игровой характер. К ним относятся очки, используемые в качестве вознаграждения за прогресс или выполнение желаемых действий; уровни, определяющие статус игрока и его рейтинг среди других игроков; таблицы результатов, дающие возможность сравнения себя с другими и отслеживания своего продвижения; задания, определяющие возможность заработать очки и выйти на более высокий уровень [6]. Вербах и Хантер указывают на важность такой игровой динамики как эмоции (азарт, удивление, разочарование, радость), которая имеет наибольшее влияние на вовлечение в основную деятельность и изменение поведения студентов. Благодаря эмоциональному фону игроки воспринимают свою деятельность как игру, а не обязанность, что способствует полному погружению в учебный процесс [5].

Одним из психологических механизмов, лежащих в основе геймификации, является учебная и игровая мотивация. Условием вовлечения в учебную деятельность, имеющую игровой характер, является баланс внутренней и внешней мотивации обучающихся. Интерес к учебному предмету, к игре, к процессу решения игровых заданий свидетельствует о наличии внутренней мотивации. Именно благодаря ей и появляется удовольствие от игры. Превращение игрового процесса в способ зарабатывания очков, достижения уровней и вознаграждений обращено к внешней мотивации. При отсутствии внутренней мотивации игрок движим исключительно внешними наградами. Отмена вознаграждения ведет в этом случае к прекращению желаемого поведения и выхолащивает первоначальный смысл игры как средства, способствующего более эффективному обучению. А в некоторых случаях эти инструменты превращаются в средства демотивации студентов, имеющих низкий игровой рейтинг. Тогда вместо удовольствия студент ис-

пытывает дополнительное напряжение и стремится избегать неприятной ситуации. При отсутствии познавательной мотивации возникает необходимость в применении дополнительных методов, повышающих учебную и игровую мотивацию. Такими методами могут служить соревнование, командная работа и командное вознаграждение, удовлетворяющие потребности в компетентности, отношениях с другими людьми и автономии. Внешняя мотивация учебной и игровой деятельности помимо вознаграждений формируется также с помощью структуризации учебного контента. Четкая постановка целей и задач, определение способов и критериев их достижения, оценка промежуточных и конечных результатов в режиме реального времени, своевременная обратная связь создают ощущение контроля над ситуацией и повышают уверенность в себе.

В многочисленных источниках, посвященных геймификации в образовании, описывается применение компьютерных игр и онлайн-платформ, для изучения различных дисциплин. Применение такого рода геймификации в изучении точных и естественно-научных дисциплин представляется достаточно оправданным. В то же время, когда речь идет об изучении гуманитарных дисциплин, особенно таких, которые направлены на формирование компетенций в области совместной деятельности, эффективного взаимодействия или управлении людьми (менеджмент, маркетинг, управление конфликтом и деловые переговоры, управление человеческими ресурсами), целесообразно помимо отдельных элементов геймификации использовать игровые технологии. Во-первых, деловые и ролевые игры дают возможность моделировать различные ситуации группового взаимодействия будущей профессиональной деятельности. Во-вторых, они обеспечивают возможность формирования коммуникативных навыков и получения опыта управления людьми и командами. Тем не менее, и в этом случае не только возможно, но и желательно использовать элементы геймификации, которые предполагают онлайн-формат. Речь в данном случае идет об элементах, связанных с оценкой и вознаграждением достигнутых результатов и с их публикацией в открытом для студентов доступе. Введение системы очков или баллов, которые студенты могут зарабатывать на протяжении всего курса, и таблиц рейтингов участников, опубликованных на образовательной платформе в личном кабинете студентов, стимулирует активное участие в игровых практических занятиях и обеспечивает их соревновательность. Помимо постановки целей, структурирования учебного процесса как игрового возникает необходимость разработать систему критериев и вознаграждений

для оценки, как групповой работы, так и индивидуальных достижений участников. Геймификация, включающая использование данных элементов, в значительной степени изменяет традиционные деловые игры, где главным элементом игры является моделирование реальной ситуации с помощью сценария и последующего анализа результатов игры. И если реализация сценария всегда сопровождается высокой вовлеченностью, то анализ результатов игры, как правило, наименее интересная часть работы для студентов. Внесение элементов вознаграждения и соревнования в этот этап занятия способствует формированию мотивации более активного участия в обсуждении собственно образовательного контента. По мнению ряда исследователей геймификация должна служить не только средством управления учебным процессом со стороны педагогов, но и средством самоорганизации и саморазвития учащихся [3, 4, 5]. Например, предлагая задания разного уровня сложности, можно выделить задания начального уровня, обязательные для всех, задания продвинутого и высокого уровня для тех, кто хочет более глубоко освоить дисциплину, повысить свой рейтинг и получить более высокое вознаграждение. Например, в процессе проведения практических занятий по перечисленным выше дисциплинам практиковался тип заданий высшего уровня, предполагавший разработку и проведение игровых заданий по изучаемой теме дисциплины в своей учебной группе. Студент или группа студентов в этом случае брали на себя полную ответственность как за разработку, так и за реализацию игрового задания во время практического занятия. Использование подобных заданий позволяет реализовать принцип кастомизации и дать возможность студентам выбрать собственную траекторию профессионального обучения.

В условиях стремительно меняющихся рыночных реалий акцент в обучении переносится с классического теоретического обучения на развитие гибких навыков (soft skills), цифровой грамотности и способности адаптироваться к изменениям. В данном контексте выпускником кафедры экономики данных Львовым О. Л. в 2025 в практическом исследовании эффективности обучающих технологий были опробованы такие инновационные инструменты как геймификация, микрообучение, смешанное обучение. Результаты исследования описаны в его дипломной работе. По его мнению, геймификация действительно продуктивна при обучении людей различного возраста. Однако, замечает Львов О.Л., при избыточной нагрузке на игровые элементы возможно снижение эффективности – обучающиеся могут сосредоточиться на «выигрыше», а не на образовательных целях. Это, без-

условно, требует тщательного педагогического и поведенческого проектирования, заключает он.

Опыт применения игровых технологий и геймификации учебного процесса позволяет сделать следующие выводы:

1. Игровые технологии проведения учебных занятий способствуют вовлечению современного «играющего» поколения студентов в учебный процесс и реалии будущей профессиональной деятельности. Использование игровых технологий совместно с элементами геймификации дает возможность усилить эффект применения игровых технологий.

2. Создание игровой среды создает безопасное пространство экспериментирования с решением профессиональных задач и развития профессиональных компетенций.

3. Игровой характер обучения превращает учебный процесс в увлекательное занятие благодаря созданию позитивного эмоционального фона, возможности преодоления проблем в безопасной ситуации и получения признания за достигнутые результаты.

4. Включение игровых технологий совместно с элементами геймификации в практические занятия по дисциплинам гуманитарного цикла способствует лучшему усвоению учебного материала благодаря подкреплению учебной мотивации с помощью удовольствия от игры и использования инструментов вознаграждения и своевременной обратной связи.

Список используемых источников

1. Абрамкина М. О. Геймификация как инновационный метод управления поколением Z в современном менеджменте // Экономика и управление: проблемы, решения. 2015. Т. 1. № 9. С.203-209. EDN: UACTDP/ (дата обращения: 10.02.2026).

2. Волкова Т. Г., Таланова И. О. Геймификация в образовании: проблемы и тенденции // Ярославский педагогический вестник. 2022. № 5. (128). С. 26-33. http://dx.doi.org/10.20323/1813-145X-2022-5-128-26-33. https://elibrary.ru/hggytn (дата обращения: 10.02.2026).

3. Орлова О. В. Титова В. Н. Геймификация как способ организации обучения // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2015. № 9 (162). С. 60-64. EDN: ULYZOZ.

4. Коберник А. Н., Осадченко И. И. Геймификация учебного процесса в высшем учебном заведении: Теория и методология // Научен вектор на Балканите. 2021. №1 (11). С. 12-17. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/geymifikatsiya-uchebnogo-protsessa-v-vysshem-uchebnom-zavedenii-teoriya-i-metodologiya (дата обращения: 02.02.2026).

5. Вербах К., Хантер Д. Вовлекай и властвуй. Игровое мышление на службе бизнеса: пер. с англ. А. Кардаш. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. 224 с. ISBN 978-5-0057-344-0.

6. Хлыбова М. А. Элементы геймификации в процессе обучения иностранному языку в вузе // Филологический аспект: международный научно-практический журнал.

Серия: Методика преподавания языка и литературы. 2022. №01 (12) URL: https://scipress.ru/fam/articles/elementy-gejmifikatsii-v-protsesse-obucheniya-inostrannomu-yazyku-v-vuze.html (дата обращения: 14.01.2026).

GAMIFICATION AND GAME TECHNOLOGIES IN TEACHING HUMANITIES

Khitrin S, Khitrina I.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The decline in students' interest in traditional forms of education has led university professors to seek new ways to engage students in active learning. One such tool is gamification. The combination of game technologies and gamification in the teaching of humanities disciplines helps to engage students in the learning process and encourage desired behavior. As a tool for managing students' learning activities, gamification combined with game technologies can also serve as a tool for self-management and self-development.

Key words: gamification, game-based learning technologies, internal and external motivation

УДК 004
ГРНТИ 06.54.51

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

В. И. Шилков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В статье обсуждаются вопросы целесообразности цифровой трансформации предприятий критической информационной инфраструктуры на примере предприятий водоснабжения и водоотведения. Названы основные виды угроз информационной безопасности, приведено определение информационно-экономической безопасности. Приведены примеры методик для оценки возможных последствий и ущерба от воздействия информационных угроз. Обозначены основные направления и подходы к формированию систем оценки уровня информационно-экономической безопасности.

цифровая трансформация, критическая инфраструктура, водоснабжение и водоотведение, информационно-экономическая безопасность

К важнейшим элементам критической инфраструктуры экономики Российской Федерации следует относить предприятия водоснабжения и водоотведения (ВиВ), без нормального функционирования которых невозможно функционирование и развитие многих социально-экономических подсистем. Отказы в работе предприятий водоснабжения и водоотведения могут приводить к катастрофическим последствиям в социально-экономической жизни не только отдельных населенных пунктов, но и целых регионов. Эти последствия могут быть связаны как с загрязнением окружающей среды вредными и опасными веществами и нанесением ущерба здоровью граждан, так и со сбоями и значительными экономическими потерями в промышленном производстве.

С помощью цифровой трансформации предприятий ВиВ, ориентированной на оптимизацию водной инфраструктуры, повышение надежности, эффективности производства и качества водных ресурсов могут быть решены многие проблемы водной отрасли экономики. Применение информационных технологий для решения проблем водной отрасли делает возможной автоматизацию бизнес-процессов, управление и корректировку техно-

логических процессов в режиме реального времени, обработку больших данных (Big Data), прогнозирование и минимизацию рисков, анализ взаимосвязанности и взаимозависимости критических факторов, оказывающих воздействие на основные и инфраструктурные подсистемы предприятия водоснабжения и водоотведения. По мнению автора работы [1], минимизировать риски выполнения ошибочных управляющих воздействий; повысить уровень автоматизации процессов системного и сетевого администрирования; сформировать унифицированные решения по комплексному централизованному управлению информационной инфраструктурой предприятия и осуществлять централизованное администрирование и управление объектами возможно с помощью системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия (СИАУ ИИП).

Вместе с тем, несмотря на то что информатизация предприятий ВиВ способствует более глубокой интеграции между физическим и кибернетическим уровнями системы водоснабжения и позволяет повысить эффективность управления водными ресурсами, применение информационно-коммуникационных технологий приводит к возникновению рисков несанкционированного вмешательства в работу различных процессов, звеньев и систем управления. В связи с данным обстоятельством особую актуальность приобретают задачи создания надежных систем информационной безопасности предприятий водоснабжения и водоотведения, которые в настоящее время, по ряду причин, не способны противостоять комбинированным кибератакам. Авторы работы [2] к рискам информационной безопасности для значимых объектов критической информационной инфраструктуры относят риски: возникновения инцидентов; прекращения функционирования; финансовых потерь; снижения репутации; административной или уголовной ответственности.

В работе [3] приведены сведения о средствах, применяемых производителями SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition System) для защиты от угроз информационной безопасности. Так, например, компания Siemens, не только предоставляет услуги по организации постоянного мониторинга, оценке промышленной безопасности и защите производственных процессов, но и предлагает многоуровневые решения, основанные на применении промышленных брандмауэров, инструментов сегментации сети и удаленном доступе.

Для обеспечения безопасности систем SCADA и защиты от информационных угроз компании Emerson и GE Digital, предлагают решения, по

применению как операционных, так и информационных технологий, делая акцент на обнаружение и реагирование в режиме реального времени. Инструментальные средства обеспечивают возможности шифрования, сегментации сети и удаленного доступа. Комплексные услуги по выявлению уязвимостей, оценке безопасности и разработке индивидуальных стратегий безопасности для промышленных объектов, предлагаемые компанией ABB, фокусируются на обеспечении безопасности систем SCADA и включают комбинации организационно-технологических, программно-аппаратных решений, к которым относятся устройства разделения сети, модули шифрования и системы контроля доступа. В работе [4] приведены сведения об инструментальных средствах, используемых в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) на предприятиях Российской Федерации, являющихся субъектами критической информационной инфраструктуры. Так, например, критические уязвимости были найдены программных комплексах фирм Martem (TELEM-GW6/GWM), Emerson (AMS DeviceManager), Rockwell Automation (RSLinxClassic). Применение этих инструментов на предприятиях критической информационной инфраструктуры в информационно-телекоммуникационных сетях, в информационно-аналитических системах и АСУ ТП может приводить к значительным финансово-экономический ущербам.

Наличие рисков и угроз, возникающих в связи с использованием в процессах управления информационной составляющей, приводит к необходимости применения термина информационно-экономическая безопасность, определяемой как некоторое стабильное состояние, при котором не причиняется ущерба информационной и экономической составляющей процессов функционирования и развития предприятия водоснабжения и водоотведения. Следует принять во внимание, что в связи с тем, что внедрение информационно-коммуникационных технологий может быть связано с необходимостью реализации ряда затратных мероприятий, частные и интегральные показатели, характеризующие уровень информационно-экономической безопасности предприятия, особенно на начальных этапах, могут снизиться [5].

Автор работы [6] с основными трендами, в сфере развития концепций экономической и информационной безопасности в период построения цифровой экономики связывает понятия комплаенс и форензик. Так, например, комплаенс предполагает обеспечение комплексной защиты организации, при наличии инструментов выявления, анализа и оценки рисков нарушения законодательства. Форензик связывают с деятельностью по предотвраще-

нию возникновения экономических рисков и урегулированию разногласий по финансовым, коммерческим, правовым вопросам.

Авторы работы [7] предлагают осуществлять оценку информационно-экономической безопасности предприятия не только на основе 11 частных показателей, но и с помощью интегрального показателя, сформированного с помощью квалиметрических методов. Количественная оценка уровня информационной безопасности хозяйствующего субъекта, по мнению авторов работы [8], может быть осуществлена с помощью автоматной математической модели, разработанной на основе теории стохастических автоматов, функционирующих в случайных средах. Оценка возможного ущерба от информационных угроз по методике CRAMM предполагает анализ ущербов и финансовых потерь от: разглашения персональных данных; репутационных потерь организации; разглашения информации; ухудшения здоровья персонала; потерь, связанных с восстановлением информационных ресурсов. К основным видам ущербов отнесены: ошибки, связанные с передачей информации; нарушение конфиденциальности; недоступность и несанкционированная модификация информации. Величина экономического ущерба, по методике RiskWatch определяется стоимостью информационных активов, поврежденных или уничтоженных, в результате воздействия угроз информационной безопасности.

Однако, данная методика не предполагает учет ущерба, возникающего в связи с потерями информационных активов, обеспечивающих функционирования технологического оборудования. Как правило, оценка экономического ущерба осуществляется в натуральных или денежных единицах по сложным методикам, в связи с чем, применение этих методик требует привлечения квалифицированных экспертов [9]. Система показателей, характеризующая уровень информационно-экономической безопасности предприятия, может быть представлена показателями, имеющими графическую, числовую, табличную, формально-логическую форму и должна: соответствовать управленческим стандартам оценки и обеспечения экономической безопасности предприятия, а также учитывать индивидуальные особенности предприятия и в простой и доступной для понимания форме давать комплексное и наглядное представление о системе безопасности [10]. В работе [11] отмечено, что математические формулы могут быть использованы для разработки индикаторов, которые могут характеризовать, как абсолютные, так и относительные показатели экономической устойчивости предприятия.

К абсолютным показателям, которые могут быть использованы для анализа динамики следует отнести, например, показатели, характеризующие прибыль, убыток, чистый дисконтированный доход, а к относительным – рентабельность, фондоотдачу, показатели ликвидности. Графические индикаторы, с помощью которых можно оценивать уровень информационно-экономической безопасности хорошо иллюстрируют аналитическую информацию, обеспечивая наглядность и возможность интерпретации информации. К графическим индикаторам можно отнести, например, BEP-анализ (точка безубыточности), график Ганта. К матричным индикаторам можно отнести, например, ресурсно-функциональные матрицы, матрицы BCG и Мак-Кинси, матрицу SWOT-анализа. По мнению авторов работы [12], к процедурам, обеспечивающим кибербезопасность высокотехнологичных компаний, следует отнести, организационно-технические процедуры, необходимые для создания условий по полному обеспечению кибербезопасности промышленного объекта.

К процедурам, ориентированным на подготовку сотрудников службы безопасности, можно отнести, например, специальные тренинги по кибербезопасности, а также игры, моделирующие и симулирующие цифровые атаки. К контрольно-аналитическим процедурам можно отнести, например, процедуры, связанные с: оценкой защищенности от цифровых атак техники, оборудования, систем, программных продуктов; аудитом основных бизнес-процессов; контроллингом информационной и экономической безопасности; внутренними расследованиями цифровых атак. К административно-управленческим процедурам можно отнести процедуры по созданию системы централизованного управления информационно-экономической безопасности предприятия. К процедурам, направленным на управление новой техникой и новыми системами, а также на реализацию стратегии по развитию программно-аппаратного комплекса можно отнести процедуры: приобретения и внедрения новой техники и программных продуктов, а также систем защиты от цифровых атак; установки систем обнаружения вторжений (цифровых атак); устранение уязвимости объектов и процессов; постоянное обновление систем защиты.

В работе [13] отмечено, что важным и необходимым этапом разработки стратегии цифровой трансформации предприятия, является нахождение баланса между экономическими потерями и затратами на информационную защищенность, так как вероятность наступления информационного рискового события, величина экономических потерь и уровень информаци-

онно-экономической безопасности в системах управления зависят от затрат на информационную защищенность. По мнению автора работы [14], для обеспечения необходимого уровня информационно-экономической безопасности необходимо разработать конкретные регламенты, процедуры и программы мероприятий по обеспечению информационной безопасности предприятия, которые должны соответствовать не только стратегии развития предприятия, но и концепции и государственной политике обеспечения информационной безопасности.

Таким образом, цифровая трансформация предприятий ВиВ не может быть сведена только к «механическому» применению информационных технологий в производственно-технологической и административной деятельности предприятия. Для осуществления эффективной трансформации требуется решить целый ряд задач по созданию эффективных систем информационной безопасности предприятия. Одной из таких задач является задача разработки и внедрения гибкой системы управления информационно-экономической безопасностью предприятий водоснабжения и водоотведения.

Список используемых источников

1. Басыня Е. А. Управление объектами критической информационной инфраструктуры предприятия. Защита информации. Инсайд. 2020.№3(93). С. 12-19.

2. Кидяева С. М., Шабурова А. В., Селифанов В. В. Вопросы организации менеджмента рисков значимых объектов критической информационной инфраструктуры. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 6. С. 82-87.

3. Нестеров С. В., Федянин А. В. Анализ безопасности SCADA-систем для промышленных объектов на примере МП «Калининградтеплосети». В книге: Фундаментальные и прикладные исследования в области высоких технологий. Сборник научных трудов. Калининград, 2024. С. 46-57.

4. Гавдан Г. П., Иваненко В. Г., Салкуцан А. А. Обеспечение безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры. Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26.№ 4. С. 69-82.

5. Касаткин П. А., Киренберг А. Г., Медведев А. В., Прокопенко Е. В. Математическая модель информационно-экономической безопасности организации. Экономика и управление инновациями. 2023.№1(24). С. 85-92.

6. Мамонтова С. В. Основные тренды информационно- экономической безопасности // Тренды развития современного общества: управленческие, правовые, экономические и социальные аспекты. Сборник научных статей 11-й Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 143-147.

7. Фокина Н. А., Косенкова А. И. Формирование системы показателей и выбор метода оценки уровня информационно- экономической безопасности предприятия // Эффективное управление экономикой: проблемы и перспективы. Материалы научно-практической конференции. 2016. С. 104-108.

8. Стрельцова Е. Д., Титов А. Ю., Яковенко И. В. Математическая модель оценки информационной безопасности хозяйствующих субъектов. Друкеровский вестник. 2024. № 2 (58). С. 182-193.

9. Люльченко А. Н., Швед В. Г., Ожиганова М. И., Костюков А. Д. Метод количественной оценки ущерба от воздействия угроз безопасности информации. Защита информации. Инсайд. 2021. № 5 (101). С. 11-15.

10. Кротенко Т. Ю., Антонов С. А., Казеева О. Г. К вопросу об индикации информационно-экономической безопасности предприятия // Современные подходы к трансформации концепций государственного регулирования и управления в социально-экономических системах. Сборник научных трудов 9-й Международной научно-практической конференции. 2020. С. 246-249.

11. Антонов С. А., Казеева О. Г., Кротенко Т. Ю. Выявление угроз информационно-экономической безопасности предприятия // Современные подходы к трансформации концепций государственного регулирования и управления в социально-экономических системах. Сборник научных трудов 9-й Международной научно-практической конференции. 2020. С. 38-41.

12. Каштанов В. В., Калинин В. В. Контроллинг и защита промышленных предприятий при помощи процедур обеспечивающих кибербезопасность // Наука и технологии: актуальные вопросы, достижения, инновации. Сборник докладов и материалов II Национальной научно-практической конференции. АНО ВО «Институт непрерывного образования». 2018. С. 46-52.

13. Соколов Р. В. Оценка информационно-экономической безопасности в системах управления производственной компанией // Региональная информатика (РИ-2022). Юбилейная XVIII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 247-248.

14. Наплекова Т.К. Информационно-экономическая безопасность организации // Качество управленческих кадров и экономическая безопасность организации. Тринадцатые Ходыревские чтения. Сборник материалов национальной научно-практической конференции. под ред. В. Н. Ходыревской. 2019. С. 353-355

DIGITAL TRANSFORMATION AND MANAGEMENT OF INFORMATION AND ECONOMIC SECURITY OF WATER SUPPLY AND SANITATION ENTERPRISE

Shilkov V.
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

The article discusses the expediency of digital transformation of critical information infrastructure enterprises using the example of water supply and sanitation enterprises. The main types of threats to information security are named, and the definition of information and economic security is given. Examples of methods for assessing the possible consequences and damage caused by information threats are given. The main directions and approaches to the formation of systems for assessing the level of information and economic security are outlined.

Key words: digital transformation, critical infrastructure, water supply and sanitation, information and economic security

УДК 336.76
ГРНТИ 06.75.23

ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА И КРИПТОВАЛЮТЫ: ИХ РОЛЬ, ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ

И. Б. Щербаков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается влияние криптовалют на глобальную экономику, как их перспективы, так и риски. Криптовалюты, такие как Биткоин и Эфириум, предлагают новые возможности для финансовой инклюзии, снижения транзакционных издержек и инноваций в финансовых технологиях. Однако высокая волатильность, регуляторные неопределенности и киберугрозы ставят перед инвесторами и пользователями серьезные вызовы. Анализируются ключевые аспекты криптовалютного рынка, включая его доступность, влияние на международные переводы и экологические вопросы. Все это направлено на создание целостного понимания роли криптовалют в современном финансовом ландшафте, что позволяет оценить их потенциал и угрозы в контексте устойчивого развития цифровой экономики.

криптовалюты, Биткоин, глобальная экономика, киберугрозы, цифровая экономика, финансовые технологии

Криптовалюты, начиная с запуска Биткойна в 2009 году, произвели революцию в финансовой сфере, изменив представление о деньгах и способах их использования [1]. Эти цифровые активы привлекли внимание не только инвесторов, но и широкой общественности, а также государственных регуляторов. Сравнение популярных криптовалют представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение популярных криптовалют

Криптовалюта	Год запуска	Максимальное предложение	Основные характеристики
Биткоин	2009	21 млн монет	Децентрализованная, основный актив
Лайткойн	2011	84 млн монет	Быстрые транзакции, легкий алгоритм майнинга
Риппл	2012	100 млрд токенов	Фокус на банковских переводах
Догикоин	2013	Без ограничений	Сообщество, малые транзакционные издержки
Эфириум	2015	Без ограничений	Смарт-контракт, платформы для DApps

Современные криптовалюты, основанные на технологии блокчейн, представляют собой принципиально новый этап развития финансовых технологий, бросающий вызов традиционным представлениям о денежном обращении и финансовых услугах. Эти цифровые активы сочетают в себе свойства платежного средства, инвестиционного инструмента и технологической платформы, формируя уникальную экономическую экосистему [2]. Их фундаментальное отличие от традиционных финансовых инструментов заключается в децентрализованной архитектуре, использовании криптографических методов защиты и отсутствии единого эмиссионного центра.

Технологические особенности различных криптовалютных систем, включая механизмы достижения консенсуса, уровни обеспечения анонимности и параметры масштабируемости, определяют их практическую применимость в различных экономических условиях. Социально-экономическое значение криптовалют особенно ярко проявляется в контексте решения проблемы финансового исключения. В странах с нестабильной финансовой системой и высоким уровнем инфляции цифровые активы становятся фактической альтернативой национальным валютам, выполняя все традиционные функции денег. Эта тенденция особенно усиливается в периоды экономических кризисов, когда доверие к традиционным финансовым институтам существенно снижается.

Доступность криптовалютных решений через мобильные приложения создает уникальные возможности для финансовой интеграции социальных групп, традиционно исключенных из банковской системы. Экономическая эффективность криптовалютных транзакций проявляется особенно заметно в сфере международных расчетов и денежных переводов, где они предлагают существенное сокращение издержек и времени проведения операций по сравнению с традиционными системами. Однако высокая волатильность курсов ведущих криптовалют пока ограничивает их использование в качестве стабильного средства расчетов и единицы учета.

Технологический потенциал криптовалютных платформ открывает новые перспективы для трансформации финансовых услуг через развитие децентрализованных приложений и смарт-контрактов. Эти инновации создают основу для принципиально новых бизнес-моделей, способных повысить прозрачность операций, снизить транзакционные издержки и расширить доступ к финансовым услугам. Однако их широкомасштабное внедрение сталкивается с рядом технологических ограничений, включая проблемы масштабируемости, вопросы совместимости различных протоколов и сложности интеграции с традиционной финансовой инфраструктурой.

Анализ рисков, связанных с криптовалютным рынком, выявляет несколько системных проблем [3]. Значительные колебания курсов цифровых активов создают существенные макроэкономические риски и ограничивают их использование в качестве стабильного средства расчетов [4].

Регуляторная неопределенность, проявляющаяся в радикально разных подходах различных юрисдикций, осложняет долгосрочное планирование для участников рынка. Вопросы кибербезопасности остаются критически важными, о чем свидетельствуют случаи взломов криптовалютных платформ и краж цифровых активов. Экологические последствия майнинга, особенно основанного на энергоемких алгоритмах, вызывают все большую озабоченность в контексте глобальных усилий по снижению углеродного следа.

Перспективы развития криптовалютного рынка требуют сбалансированного подхода, сочетающего инновационный потенциал технологии с эффективным управлением рисками. Важным направлением является разработка механизмов саморегулирования отрасли, способствующих повышению прозрачности операций и защите прав инвесторов. Параллельно необходимо формирование адаптивной нормативно-правовой базы, которая обеспечивала бы правовую определенность для инноваций при должном уровне защиты потребителей. Особое значение имеют образовательные инициативы, направленные на повышение финансовой грамотности в области цифровых активов и подготовку специалистов по блокчейн-технологиям.

Развитие криптовалютной экосистемы характеризуется усилением процессов институционализации и постепенной интеграции с традиционной финансовой системой. Этот тренд проявляется в появлении новых инвестиционных продуктов, развитии цифровых валют центральных банков и внедрении блокчейн-решений крупными финансовыми институтами [5]. Успешная трансформация криптовалют в элемент глобальной финансовой инфраструктуры требует конструктивного диалога между всеми заинтересованными сторонами, включая технологические компании, финансовые институты, регуляторные органы и академическое сообщество.

Реализация комплексного подхода к развитию криптовалютных технологий позволит раскрыть их потенциал для создания более инклюзивной, эффективной и устойчивой финансовой системы. При этом необходимо сосредоточиться на анализе долгосрочного воздействия криптовалют на монетарную политику и финансовую стабильность, а также на разработке методов количественной оценки системных рисков. Особого внимания заслуживает изучение эффектов массового внедрения цифровых валют центральных банков и их взаимодействия с децентрализованными криптовалютными системами [6].

Перспективным представляется изучение социально-экономического воздействия криптовалютных технологий, включая их роль в повышении финансовой инклюзии, снижении стоимости трансграничных переводов и развитии новых форм экономической активности. Не менее важным является анализ институциональных факторов, способствующих или препятствующих успешной интеграции цифровых активов в существующую финансовую инфраструктуру, при этом необходимо опираться на междисциплинарный подход, сочетающий методы экономического анализа, правового регулирования и технологической экспертизы, что позволит выработать сбалансированные рекомендации для всех участников формирующейся цифровой финансовой экосистемы.

Список используемых источников

1. Третьякова С. А., Котельников Н. В., Уразова Н. Г. Роль криптовалюты в современной экономике // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2022. № 6 (часть 1). С. 170–175.

2. Кузнецов И. В. Роль Bitcoin и других криптовалют в мировой экономике // Страховое право. 2017. № 3. С. 56–60.

3. Генкин А. С. Криптотехнологии и криминальные риски: есть ли повод для тревоги? // Страховое дело. 2017. № 5. С. 47–55.

4. Сидоренко Э. Л. Криптовалюта и будущее цифровых финансов. М.: Издательство «МГИМО-Университет», 2023. 36 с.

5. Агеев А. И., Логинов Е. Л. Криптовалюты, рынки и институты // Экономические стратегии. 2018. № 1. С. 94–107.

6. Абрамов А. С. Анализ использования криптовалют их влияние на мировую экономику // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6. URL: https://esj.today/PDF/47ECVN622.pdf (дата обращения: 27.01.2026).

DIGITAL ECONOMY AND CRYPTOCURRENCIES: THEIR ROLE, PROSPECTS AND RISKS

Shcherbakov I.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The impact of cryptocurrencies on the global economy, both their prospects and risks are considered. Cryptocurrencies such as Bitcoin and Ethereum offer new opportunities for financial inclusion, lower transaction costs, and innovation in financial technology. However, high volatility, regulatory uncertainties and cyber threats pose serious challenges for investors and users. Key aspects of the cryptocurrency market are analyzed, including its accessibility, impact on international transfers, and environmental issues. All this is aimed at creating a holistic understanding of the role of cryptocurrencies in the modern financial landscape, which makes it possible to assess their potential and threats in the context of the sustainable development of the digital economy.

Key words: cryptocurrencies, Bitcoin, global economy, cyber threats, digital economy, financial technologies

УДК 378:316.77
ГРНТИ 14.35.07

РАЗВИТИЕ МЕДИАКОМПЕТЕНТНОСТИ СТУДЕНТОВ КОММУНИКАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ В АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МЕДИАСРЕДЕ

Д. А. Щетинина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Трансформация цифровой медиасреды в условиях медиатизации и алгоритмической персонализации формирует новые требования к подготовке специалистов в области коммуникаций. Платформенные алгоритмы структурируют медиапотоки, что изменяет характер медиапотребления и профессиональной деятельности. В статье предложена адаптация показателей медиакомпетентности с учетом алгоритмического контекста. Разработаны практико-ориентированные подходы к включению алгоритмической проблематики в образовательный процесс студентов коммуникационных специальностей.

медиаобразование, медиакомпетентность, алгоритмическая персонализация, цифровые платформы

Социальная динамика на современном этапе во многом определяется процессом медиатизации – превращением медиа в фундаментальную инфраструктуру социальных взаимодействий. Согласно концепции С. Хьяварда, возрастающая зависимость социума от этой логики проявляется в двух формах: прямой медиатизации (опосредование ранее непосредственных видов деятельности, например, онлайн-образование) и косвенной (влияние медийных символов и репрезентаций). Следствием данного процесса становится адаптация различных социальных систем (политики, религии, образования) к институциональным и технологическим требованиям медиа, включающим специфические форматы организации контента, коммуникативные стратегии и способы смыслопроизводства [1].

В условиях медиатизированной реальности цифровая среда становится ключевым пространством производства, распространения и потребления информации. Сетевые платформы обеспечивают постоянную включенность индивидов в коммуникационные процессы, размывая границы между потреблением и производством контента. Пользователь одновременно выступает читателем, автором и участником публичных дискуссий, что повышает требования к критичности, ответственности и осознанности взаимодействия с медиа.

Совокупность данных способностей описывается через понятие медиакомпетентности. А. В. Федоров определяет ее как умение использовать, критически анализировать, оценивать и передавать медиатексты в различных видах, формах и жанрах, анализировать сложные процессы функционирования медиа в социуме [2]. Для студентов коммуникационных специальностей медиакомпетентность выходит за рамки общей культурной грамотности и приобретает выраженный профессиональный характер: если рядовой пользователь ограничивается критической интерпретацией готовых сообщений, то будущий специалист в области коммуникаций должен владеть широким инструментарием производства и управления информацией. В данном контексте медиакомпетентность сопряжена с практическим проектированием медиапродуктов (переходом от роли интерпретатора к роли создателя), стратегическим управлением коммуникационными потоками (конструирование медиалогики для достижения целей) и выстраиванием эффективного взаимодействия с различными типами аудиторий.

Широкое понимание профессиональных требований актуализирует обращения к теоретическим моделям медиакомпетентности. Одной из наиболее разработанных в отечественной науке является классификация А. В. Федорова, включающая семь показателей [3]:

– мотивационный – мотивы контакта с медиа и медиатекстами: жанровые, эмоциональные, психологические, эстетические и пр.;
– контактный – частота общения с медиа;
– информационный – знание теории и истории медиакультуры, процесса массовой коммуникации;
– перцептивный – способности к восприятию медиатекстов;
– интерпретационный (оценочный) – умения анализировать медиатексты на основе критического мышления;
– практико-операционный (деятельностный) – умения создавать и распространять медиатексты;
– креативный – наличие творческого начала в медиадеятельности.

Данная классификация позволяет не только зафиксировать многокомпонентную природу медиакомпетентности, но и соотнести профессиональные требования с ее отдельными структурными элементами. Если для рядового пользователя доминирующее значение сохраняют мотивационный, контактный и перцептивный компоненты, то в профессиональной структуре медиакомпетентности на первый план выходят интерпретационный, практико-операционный и креативный показатели, интегрированные с ин-

формационным блоком, обеспечивающим понимание условий функционирования медиа.

Однако само понимание этих условий требует существенного расширения, поскольку медиасреда претерпевает структурные изменения. М. М. Назаров отмечает, что доминирование платформ и алгоритмических решений формирует коммуникационную «машинерию», меняющую принцип работы с информацией и социальными взаимодействиями [4]. Современные платформы функционируют как инфраструктуры управления информационными потоками, в которых процессы отбора, ранжирования и распространения сообщений все чаще автоматизируются. Ключевым механизмом становятся алгоритмы – процедуры обработки пользовательских данных, обеспечивающие персонализацию, рекомендации и прогнозирование поведения аудитории. Видимость контента, охваты и вовлеченность все меньше определяются редакционными или профессиональными решениями и все в большей – логикой автоматизированных систем.

Следствием алгоритмической персонализации становится формирование для каждого пользователя селективно сконструированной медиареальности. Э. Паризер определяет это явление как эффект «пузыря фильтров» [5] – индивидуальной информационной среды с ограниченным набором точек зрения и контекстов. В результате сама интерпретация событий и явлений может принципиально различаться у пользователей, поскольку исходный материал формируется автоматизированными системами, а не объективными редакционными стандартами.

В этих условиях традиционные подходы к развитию медиакомпетентности требуют пересмотра. Если ранее обучение акцентировалось на критической оценке медиатекстов и создании контента, теперь необходимо интегрировать понимание алгоритмической структуры медиасреды. Студенты должны осознавать, что видимость информации и состав медиапотоков формируются не случайно, а через алгоритмы, которые персонализируют контент, создавая эффект «пузыря фильтров».

Из данного тезиса вытекает вопрос о практическом включении алгоритмической проблематики в образовательный процесс подготовки специалистов в области коммуникаций. Такое включение может реализовываться через несколько взаимосвязанных направлений:

1. Анализ алгоритмических медиапотоков. Изучение механизмов фильтрации и ранжирования контента, сравнение рекомендаций на разных

аккаунтах и в разных условиях, что формирует навыки интерпретационного и перцептивного уровней медиакомпетентности;

2. Проектирование медиаконтента с учетом алгоритмов. Создание медиатекстов и кампаний с ориентацией на алгоритмические критерии платформ (видимость, вовлеченность, механизмы рекомендаций), что развивает практико-операционный и креативный уровни компетентности;

3. Рефлексия собственного медиапотребления. Ведение медиадневников и анализ собственных лент для осознания влияние алгоритмов на восприятие информации, что формирует критическое отношение к «пузырю фильтров» и развивает мотивационный уровень медиакомпетентности;

4. Методы анализа и визуализации алгоритмов. Знакомство с инструментами отслеживания продвигаемого и скрываемого контента – усиливает информационный и интерпретационный уровни медиакомпетентности, превращая знание о медиасреде в практический ресурс.

Предложенные направления позволяют не просто дополнить существующую модель медиакомпетентности новым содержанием, но и переосмыслить каждый из ее компонентов сквозь призму алгоритмической реальности. Системное соотнесение показателей А. В. Федорова с алгоритмическим контекстом представлено в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Интеграция алгоритмического понимания в показатели медиакомпетентности А. В. Федорова

Показатель медиакомпетентности (по Федорову)	Адаптация к алгоритмической среде (компетенция)	Примеры учебных заданий и практик
Мотивационный	Осознание влияния алгоритмов на формирование информационной повестки и личных предпочтений	Ведение дневника потребления с последующим анализом того, какой контент был найден целенаправленно, а какой навязан рекомендательными системами
Контактный	Понимание роли алгоритмов как ключевого посредника, структурирующего частоту и режим взаимодействия с медиа	Сравнение содержимого новостных лент на аккаунтах с разной историей активности или использование режима «инкогнито» для оценки неперсонализированного контента

Показатель медиакомпетентности (по Федорову)	Адаптация к алгоритмической среде (компетенция)	Примеры учебных заданий и практик
Информационный	Знание принципов работы рекомендательных систем, механизмов ранжирования, понятий «пузырь фильтров» и «эхо-камеры».	Кейс-стади, отслеживающее путь конкретной новости по платформам и выявляющее алгоритмические факторы (тренды, вовлеченность), повлиявшие на ее виральность или затухание.
Перцептивный	Способность идентифицировать алгоритмически обусловленные искажения («сдвиги») в медиапотоке.	Выявление разницы в подаче одной и той же темы в лентах разных соцсетей, а также фиксация тем, систематически попадающих в «теневой бан»
Интерпретационный (оценочный)	Критический анализ медиатекста в контексте его «продвигаемости»: оценка достоверности с учетом логики платформы, а не только содержания	Выявление отсутствующих точек зрения по конкретной проблеме и обоснование того, почему алгоритм мог их скрыть (низкая вовлеченность, маркировка как непопулярного).
Практико-операционный (деятельностный)	Использование алгоритмических механизмов (метрик ранжирования, триггеров вовлеченности) для эффективного производства и распространения контента	A/B-тестирование контента: создание поста в двух вариантах (с триггерами и без) с последующим анализом охватов и рекомендаций платформы
Креативный	Творческое преодоление алгоритмических ограничений: поиск нестандартных форматов и мультиплатформенных стратегий.	Разработка медиапроектов, направленных на диверсификацию информационного потока и преодоление эффекта «эхо-камеры»

Представленная интеграция демонстрирует, что включение алгоритмической проблематики в образовательный процесс не отменяет и не подменяет классическую структуру медиакомпетентности, но существенно обогащает ее, наполняя каждый из показателей новым содержанием, соответствующим реалиям современной медиасреды. Тем самым формирование профессиональной медиакомпетентности у студентов коммуникационных специальностей приобретает комплексный характер, позволяя будущим специалистам не только адаптироваться к алгоритмически опосредованной среде, но и использовать знание ее механизмов в качестве действенного ин-

струмента для решения профессиональных задач. Дальнейшая разработка методического обеспечения предложенных направлений составит перспективу данного исследования.

Список используемых источников

1. Hjarvard S. The Mediatization of Culture and Society. London: Routledge. 2013. 173 p.

2. Федоров А. В. Медиаобразование: вчера и сегодня // Информация для всех. 2009. С. 172-175

3. Федоров А. В. Медиаобразование: История, теория и методика: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Прогресс, 2001. 708 с.

4. Назаров М. М. Платформы и алгоритмизация в медиа: содержание и социальные следствия // Коммуникология. 2020. № 2.

5. Паризер Э. За стеной фильтров. Что Интернет скрывает от вас? / Э. Паризер; пер. с англ. А. Ширикова. М.: Альпина Бизнес Букс, 2012. 304 с.

Статья представлена и.о. заведующего кафедрой СПН СПбГУТ, кандидатом политических наук А. В. Кульназаровой.

DEVELOPMENT OF MEDIA COMPETENCE AMONG COMMUNICATION STUDENTS IN AN ALGORITHMIC MEDIA ENVIRONMENT

Shchetinina D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The transformation of the digital media environment under conditions of mediatization and algorithmic personalization generates new requirements for the training of communication specialists. Platform algorithms structure media flows, thereby reshaping patterns of media consumption and professional practice. The article proposes an adaptation of media competence indicators with consideration of the algorithmic context. Practice-oriented approaches to integrating algorithmic issues into the educational process of communication students are developed.

Key words: media education, media competence, algorithmic personalization, digital platforms

УДК 339.9
ГРНТИ 06.51.02

ЭКОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД КИТАЯ В РАЗВИТИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИННОВАЦИЙ

Т. И. Ююкина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуются следующие ключевые акторы экосистемы промышленных инноваций Китая: регионы Пекин – Тяньцзинь – Хэбэй и дельты реки Янцзы, район Большого залива. В центре внимания автора не только технологические аспекты обозначенной предметной области, но и переосмысление бизнес-моделей, совместного развития продуктов, обмена знаниями и ресурсами. На основе сформированной форсайт-траектории актуализируются вопросы сотрудничества в рамках глобальной промышленно-инновационной экосистемы, в которой Китай выступает узловым центром цифровых технологий.

экосистема, промышленный кластер, инновация, НИОКР, цифровая трансформация промышленности, цифровые технологии и сервисы

Многообразие моделей инновационного развития – от экосистем, основанных на научных исследованиях, до стартап-хабов, активно финансируемых венчурным капиталом, определяет возможные подходы в достижении инноваций. Высокотехнологичный экспорт и укрепление ведущей роли в глобальных цепочках создания стоимости, особенно в таких стратегических направлениях, как искусственный интеллект и полупроводники – актуальные внешнеэкономические позиции Китая. Однако экономика промышленности и формирование современной модели развития страны в целом сталкивается с новыми вызовами на фоне замедления и неопределенности глобального экономического роста, устойчивой базовой инфляции крупнейших экономик мира и растущей фрагментации торговли. Построение промышленной системы в настоящее время базируется на развитии передового производства и реализации ряда комплексных мер по стабилизации роста страны, принятых Государственным советом [1], с учетом региональных расхождений в инновационных экосистемах – коммерциализации и инвестиций или опоры на научно-исследовательскую и технологическую базу [2].

Согласно последним данным Всемирной организации интеллектуальной собственности, Китай, будучи единственной страной со средним уровнем дохода в топе 30 стран Глобального индекса инноваций (GII) 2025 года, впервые вошел в первую десятку данного рейтинга, лидируя по объему знаний и технологической продукции [3, с. 124], а в регионе занимает третье место, уступая Сингапуру и Южной Корее. В то же время Китай располагает наибольшим количеством инновационных кластеров, которые выступают центрами науки, патентования и венчурного капитала. При этом Шэньчжэнь–Гонконг–Гуанчжоу возглавляет релевантный мировой рейтинг, отражая высокие показатели по сделкам с венчурным капиталом и огромный вклад в глобальные научные публикации, патентование. Приоритетное значение для достижения отмеченных результатов оказывает влияние крупных технопарков и университетов, которые сотрудничают с ведущими промышленными предприятиями и государственными структурами, создавая совместные научно-исследовательские лаборатории и инкубаторы для стартапов с учетом сформированных платформенных рынков.

Рассмотрим в таблице 1 ключевые компетенции в области промышленных инноваций таких акторов соответствующей экосистемы, как: регионы Пекин – Тяньцзинь – Хэбэй и дельты реки Янцзы (Шанхай – Цзянсу – Чжэцзян – Аньхой), район Большого залива (Гуандун – Гонконг – Макао).

ТАБЛИЦА 1. Ключевые компетенции в области промышленных инноваций Китая

Регион / район	Сфера достижений	Компетенция
Пекин – Тяньцзинь – Хэбэй	ИИ-лаборатории, государственные квантовые центры	Платформы общего пользования для глубокого обучения
	Биотехнологии	Генерация патентов по генной инженерии и биофармацевтике (с масштабированием в Тяньцзине)
	Умное производство и робототехника	Крупнейшие кластеры по производству промышленных роботов и глубоководного оборудования
	Аэрокосмонавтика	Кластерное объединение авиастроения с новыми материалами и спутниковой навигацией
	Городская агломерация («город будущего»)	Создание «промышленных песочниц», тестирование беспилотного транспорта и цифровых валют, возведение энергоэффективных зданий в Сюнъане

Регион / район	Сфера достижений	Компетенция
	Водородный транспорт	Производство «зеленого» водорода с последующим его использованием в автобусах и грузовых автомобилях
Золотой треугольник Янцзы	Полупроводники	Полный цикл производства микросхем (от проектирования до литографии и упаковки). Наличие главного кластера микроэлектроники страны
	Биофармацевтика	Сотрудничество R&D-центров глобальных фармгигантов с местными стартапами
	Нанотехнологии	Мировое лидерство в коммерциализации нанотехнологий
	Интернет вещей (IoT)	Национальная зона развития IoT: интеграция датчиков и сенсоров в текстильную, металлургическую и химическую промышленности
	Новая энергетика	Производство солнечных панелей и ветрогенераторов
	Экономика платформ	Создание цифровых субъектов рынка
	Промышленный интернет	Облачные системы управления производством
	Квантовые технологии	Защищенные линии связи
	Дисплейные технологии	Производство LCD и OLED панелей
Большой залив (Гуандун – Гонконг – Макао)	Новые энергетические транспортные средства	Полная вертикальная интеграция: собственное производство чипов и батарей, софт
	Телекоммуникации, 5G/6G	Самая высокая плотность базовых станций 5G в мире. Инфраструктурная платформа позволяет развивать промышленный интернет и беспилотный транспорт
	Дроны и гражданская авиация	Новая ниша – экономика «малых высот»
	Автономное вождение	Один из крупнейших в мире парков робо-такси. Технологическая продукция – софт для автопилота 4-го уровня
	Новые материалы и нефтехимия	Создание экологически чистых полимеров для электроники Шэньчжэня

Регион / район	Сфера достижений	Компетенция
	Роботизация и умные заводы	Центр производства бытовой техники на основе промышленной автоматизации. Промышленные кластеры робототехники
	Рассеянный нейтронный источник	Фундаментальная инновационная платформа, позволяющая исследовать материалы на атомном уровне

Проведенное исследование позволяет выделить основополагающие закономерности обозначенных акторов экосистемы промышленных инноваций Китая:

1) увеличение степени коллегиального использования инновационных ресурсов;

2) совместное создание инновационных платформ;

3) смещение вектора промышленного развития – от поглощения к партнерскому поиску новых путей роста;

4) скоординированное развитие приоритетных отраслевых направлений в промышленности (возобновляемая энергетика и интеллектуальные транспортные средства, кибербезопасность и промышленный интернет, высокотехнологичное промышленное оборудование, робототехника и др.);

5) переход промышленного сотрудничества от связей отдельных предприятий и проектов к региональной комплементарности;

6) консолидированное формирование производственных цепочек и промышленных коридоров;

7) наличие общих узловых центров;

8) использование преимуществ рыночной ориентации;

9) генерирование распределенных кластеров передового производства для содействия синергетическому развитию промышленности.

Концепция новых качественных производительных сил включает переосмысление самих бизнес-моделей, в т.ч. – совместного развития продуктов, а также обмена знаниями и ресурсами. С этой точки зрения обосновано возникновение платформ, объединяющих тысячи малых и средних предприятий вместо вертикально-интегрированных холдингов. Создание виртуальных цепочек поставок в системе цифровых двойников экосистем позволяет моделировать риски и нивелировать их давление. В периоды пиковых нагрузок заказы могут автоматически перераспределяться между производственными подразделениями актора через сформированные единые хабы.

Обмен знаниями целесообразен с использованием инновационных коридоров[1] с общими стандартами сертификации. В результате продукт становится результатом кросс-индустриальной работы с возможностью обеспечения быстрой коммерциализации, где исследование и разработка выступают как сервис.

С учетом анализа текущих трендов развития указанных акторов промышленных инноваций Китая в рамках экосистемного подхода целесообразно обозначить следующую форсайт-траекторию:

– активация экономики замкнутого цикла[2];
– ИИ-ориентированное метапредметное сотрудничество;
– знания и квалифицированные кадры – самостоятельные активы;
– индивидуализированные адаптивные образовательные программы под профильные потребности акторов;
– коэволюция от традиционных промышленных кластеров к «интеллектуальным», основанным на общих экосистемах и цифровых платформах;
– «симбиотические» региональные партнерства;
– переход к глобальной промышленно-инновационной экосистеме на основе распределенной кластеризации;
– децентрализованная инновационная экономика.

Становление модели промышленной синергии, движимой доминирующими в акторе элементами, способствует их организации в единую взаимодополняемую экономико-сетевую структуру с высоким уровнем связей в условиях цифровой трансформации, что предопределяет включение Китая как центра соответствующих технологий в развитие глобальной инновационной экосистемы на основе обозначенных компетенций.

Список используемых источников

1. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知: 国发〔2015〕28号。国务院, 2015年5月8日 / Уведомление Государственного совета о выпуске программы «Сделано в Китае 2025»: Документ Государственного совета № 28 [2015]. Государственный совет, 8 мая 2015 г. // Официальный сайт Центрального народного правительства КНР. – URL:

[1] Например, научно-технический инновационный коридор G60, выступающий платформой комплексного развития региона дельты реки Янцзы [4, с. 19-20] с вовлечением таких городов, как: Шанхай, Цзясин, Ханчжоу, Цзиньхуа, Сучжоу, Хучжоу, Сюаньчэн, Уху и Хэфэй.

[2] Использование в рамках региона побочных продуктов или отходов одного производства в качестве сырья для другого (например, потребление тепла от дата-центров Пекина агропромышленными комплексами Хэбэя).

https://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2873744.htm (дата обращения: 15.02.2026).

2. 科技创新和产业创新融合的路径与评价体系研究（2025年）(Синяя книга об интеграции технологических и промышленных инноваций. Исследование пути и системы оценки (2025)) / 北京: 中国信息通信研究院 (Пекин: Китайская академия информационных и коммуникационных технологий), 2025年11月. – 36页.

3. Global Innovation Index 2025. Innovation at a Crossroads, 18th Edition. WIPO, 2025. 295 p.

4. 中国工业经济发展形势展望（2023年）(Белая книга о перспективах промышленно-экономического развития Китая) / 北京: 中国信息通信研究院 (Пекин: Китайская академия информационных и коммуникационных технологий), 2023年12月. – 38页.

CHINA'S ECOSYSTEM APPROACH IN ADVANCING INDUSTRIAL INNOVATIONS

Iuiukina T.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article investigates the following key actors in China's industrial innovations ecosystem: the Beijing–Tianjin–Hebei and the Yangtze River Delta regions, the Greater Bay Area. The focus of author's attention is not only on the technological aspects of designated subject area, but also on rethinking business models, joint product development, knowledge and resource sharing. Based on the formed foresight trajectory, issues of cooperation within the framework of global industrial and innovation ecosystem, in which China acts as a hub for digital technologies, are being actualized.

Key words: ecosystem, industrial cluster, innovation, R&D, digital transformation of industry, digital technologies and services

СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 654.1
ГРНТИ 49.27.01

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ

В. А. Александров, А. К. Сагдеев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Управление беспилотными аппаратами (дронами) требует высоконадежной передачи команд и сигналов обратной связи. Нарушение связи может привести к потере контроля над устройством, аварийным ситуациям и даже катастрофическим последствиям. Данная статья посвящена методам улучшения качества передачи управляющих команд в системах управления дронов, рассматривая проблемы помехоустойчивости, устойчивости к потерям пакетов и безопасности передачи данных.

беспилотный аппарат, канал связи, команда управления, методы повышения надежности передачи данных

Развитие технологий беспилотных аппаратов сопровождается ростом требований к качеству управления ими. Одной из ключевых проблем остается обеспечение надежной передачи команд управления, особенно в условиях сложных помеховой обстановки, неблагоприятных погодных условий и попыток несанкционированного вмешательства. Повышение надежности передачи становится необходимым условием эффективного функционирования современных систем управления беспилотниками, организованных различными родами связи.

Определяющим ограничением при проектировании протяженных оптических транспортных сетей является соотношение сигнал-шум (OSNR). Одним из наиболее эффективных способов борьбы с помехами является применение методов коррекции ошибок, таких как протоколы FEC (Forward

Error Correction). Эти протоколы позволяют исправлять ошибки непосредственно на стороне приемника, минимизируя необходимость повторной отправки поврежденных пакетов. FEC резко снижает количество битовых ошибок (BER), что позволяет увеличить расстояние передачи сигнала без регенерации.

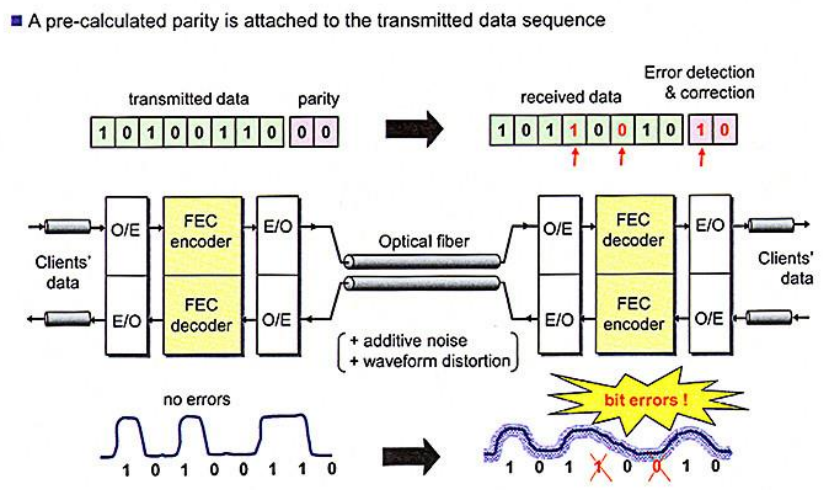


Рис. 1. Аалгоритм кодирования *FEC*

Существует несколько FEC-алгоритмов кодирования (рис. 1), которые различаются по сложности и производительности. Одним из наиболее распространенных кодов первого поколения FEC является код «Рида-Соломона» [1]. Данный код добавляет немного – 7 % проверочных байтов и около 6дБ дополнительного запаса OSNR, но для высокоскоростных оптических сетей увеличение на 6дБ является улучшенным показателем производительности, увеличивая расстояние между регенераторами примерно в четыре раза.

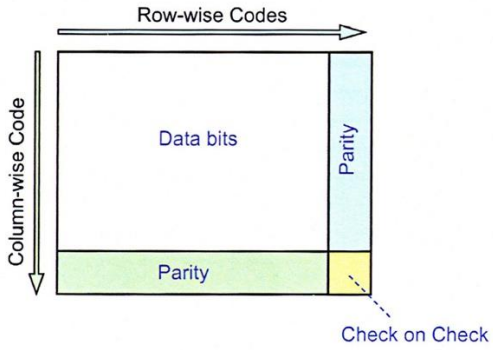


Рис. 2. Схемы кодирования *FEC* второго поколения

При реализации систем связи в дополнение к коду «Рида-Соломона» включаются более сложные схемы кодирования второго поколения FEC (рис. 2), например, превентивный параметр для оптических интерфейсов 10G и 40G. Данные алгоритмы, называемые «ультра» FEC или «усиленный» FEC (EFEC), также используют не более 7 % объема передаваемого кадра, но в них заложены более сложные алгоритмы кодирования/декодирования, которые и обеспечивают существенный выигрыш по OSNR – от 2 до 3дБ, в по отношению к коду «Рида-Соломона».

Наряду с разработками первого поколения – «Рида-Соломона FEC» и второго поколения – «EFEC», которые позволили существенно улучшить производительность для 10G- и 40G-сигналов, было разработано более производительное FEC-решение третьего поколения, обеспечивающее увеличенную дальность и оптимальную производительность для высокоскоростных каналов передачи данных 100G. FEC-решение третьего поколения основано на еще более сложных алгоритмах кодирования/декодирования и итеративного кодирования. В hard decision FEC – блок декодирования определяет «твердое» решение на основе входящего сигнала и инициализирует один бит информации как «1» или «0» путем сравнения с пороговым значением (рис. 3). Значения выше установленного порога определяются «1», а значения ниже определяются как «0». В декодере используются дополнительные биты для обеспечения более детальной и точной индикации входящего сигнала. Иными словами, декодер не только определяет на основе порогового значения – является ли входящий сигнал «1» или «0», но и обеспечивает фактор надежности «принятия решения». Коэффициент надежности определяется индикатором, показывающим насколько сигнал выше или ниже порогового значения.

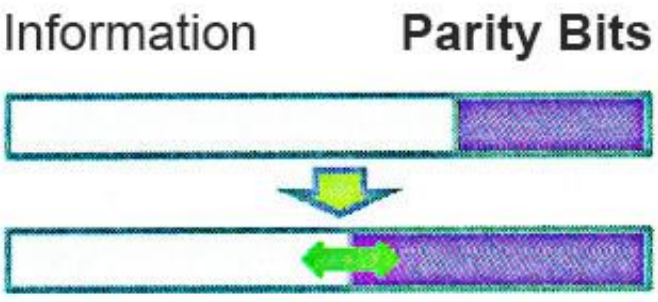


Рис. 3. Аалгоритм работы декодера

Использование коэффициента надежности или «вероятности» битов вместе с более сложными алгоритмами FEC-кодирования третьего поколения позволяет декодеру SD-FEC обеспечить дополнительное повышение OSNR на 1-2 дБ. В то время как увеличение OSNR на 1-2 дБ не звучит внушительно, оно может интерпретироваться как возможное увеличение расстояния на 20-40 %, что является существенным показателем для 100G.

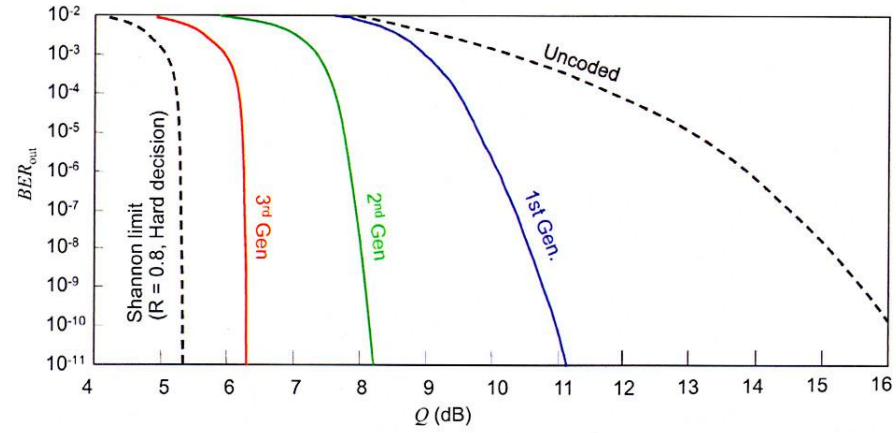


Рис. 4. Соотношение полосы пропускания в канале передачи к *OSNR*

Одним из недостатков soft decision FEC является то, что для него требуется ~20 % объема передаваемого кадра, а это более чем в два раза больше, чем занимаемый объем FEC первого и второго поколения (рис. 4).

С увеличением полосы пропускания в канале передачи данных с 10G до 100G, требование к OSNR увеличивается на 10дБ. Без определенного вида компенсации или коррекции протяженность трасс с канальной скоростью 100G будет весьма ограниченной и неэкономичной. Алгоритмы FEC первого и второго поколения были использованы на 10G и 40G для снижения BER и увеличения расстояния. SD-FEC является алгоритмом кодирования третьего поколения, обеспечивая передачу данных для оптических сетей 100G на значительные расстояния и с увеличенным ретрансляционным участком.

Другим решением проблемы повышения надежности передаваемых команд управления является применение адаптивных методик изменения частоты и мощности сигнала

Использование адаптивной регулировки частот и уровней сигнала позволяет минимизировать влияние помех путем динамического выбора оптимального режима передачи. Существующие технологии MIMO (Multiple

Input Multiple Output) предоставляют дополнительные возможности для увеличения пропускной способности и снижения вероятности потерь пакетов [2]. Технология MIMO использует пространственное измерение для увеличения емкости канала связи. Для этого на передающей и приемной сторонах применяются множественные антенны с соответствующей цифровой обработкой сигналов, что обеспечивает увеличение скорости передачи данных примерно пропорционально количеству антенн на каждом конце [3].

Исходный поток данных с высокой скоростью демультиплексируется на несколько потоков с меньшей скоростью, которые затем модулируются и одновременно передаются с разных антенн на одной и той же частоте, но с различным кодированием. На приемной стороне эти взаимно мешающие потоки имеют разные пространственные сигнатуры (схемы усиления и фаз на антеннах приемника), что позволяет приемнику разделять, демодулировать и ремультиплексировать их в исходный высокоскоростной поток. Такой подход также называется пространственным мультиплексированием.

Ключевым моментом в работе MIMO является наличие достаточно различных пространственных сигнатур потоков, что достигается за счет широкого углового рассеяния многолучевых сигналов, а также необходимого расстояния между элементами антенн. В средах с богатым многолучевым распространением сигнала, например, в сотовых и Wi-Fi сетях, достаточно расстояния между антеннами в несколько длин волн. В случае слабого многолучевого рассеяния требуется большее расстояние между элементами антенны на передающей, приемной или на обеих сторонах [4].

Обеспечение конфиденциальности и целостности передаваемых команд важно не только для предотвращения несанкционированного доступа, но и для защиты от подделывания команд управления. Используются шифрование и цифровые подписи для аутентификации отправителя команды.

Применение машинного обучения и анализа поведения системы позволяет своевременно выявлять возможные нарушения связи и автоматически предпринимать меры по восстановлению работоспособности канала связи [5].

Повышение надежности передачи команд управления в системах управления беспилотниками является актуальной задачей, решение которой обеспечит надежность передачи команд управления в системах управления беспилотниками.

Список используемых источников

1. Гольдштейн Б. С., Гольдштейн А. Б. Технология и протоколы MPLS // СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 304 с.
2. Фокин Г. А. Технологии умных антенн: учебное пособие в 4-х ч. // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, С.-Петерб. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. СПб.: СПбГУТ, 2023.
3. Ермолаев В. Т., Флаксман А. Г., Елохин А. В., Сорокин И. С. Пространственная обработка сигналов в mimo-системах сотовой связи. Учебное пособие. Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020. 134 с.
4. Александров В. А., Малаев Я. О., Мирошник М. А., Титова О. В. Математическое моделирование показателя своевременность для параметра качество связи // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2020. С. 17-21.
5. Александров В. А., Лубянников А. А., Проценко М. С., Стахеев И. Г. Мониторинг функционирования узлов связи специального назначения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 3-х томах. 2016. С. 87-90.

METHODS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF CONTROL COMMAND TRANSMISSION IN UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL SYSTEMS

Alexandrov V., Sagdeev A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The control of unmanned aerial vehicles (drones) requires highly reliable transmission of commands and feedback signals. Communication failures can lead to loss of control over the device, accidents, and even catastrophic consequences. This article focuses on methods for improving the quality of control command transmission in drone control systems, addressing issues such as noise immunity, packet loss resistance, and data security.

Key words: unmanned aerial vehicle, communication channel, control command, methods for improving data transmission reliability

УДК 623.626
ГРНТИ 78.25.41

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ОТ ТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Д. Н. Васильев, А. К. Сагдеев, Д. С. Самаркин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В ходе проведения специальной военной операции информационно-телекоммуникационная сеть военного назначения подвергается воздействию технической разведки противника, с целью недопущения (и/или снижению) последствий предложены методы повышения защищенности.

техническая разведка, радиоразведка, информационно-телекоммуникационная сеть военного назначения

В ходе проведения специальной военной операции система связи Вооруженных сил Российской Федерации испытывает постоянное воздействие различных видов технических разведок, воспрепятствовать разведывательным действиям или снизить их интенсивность на информационно-телекоммуникационную сеть одна из первоочередных задач войск связи [1]. Основные виды технических разведок, оказывающих влияние на систему связи представлены на рисунке 1.

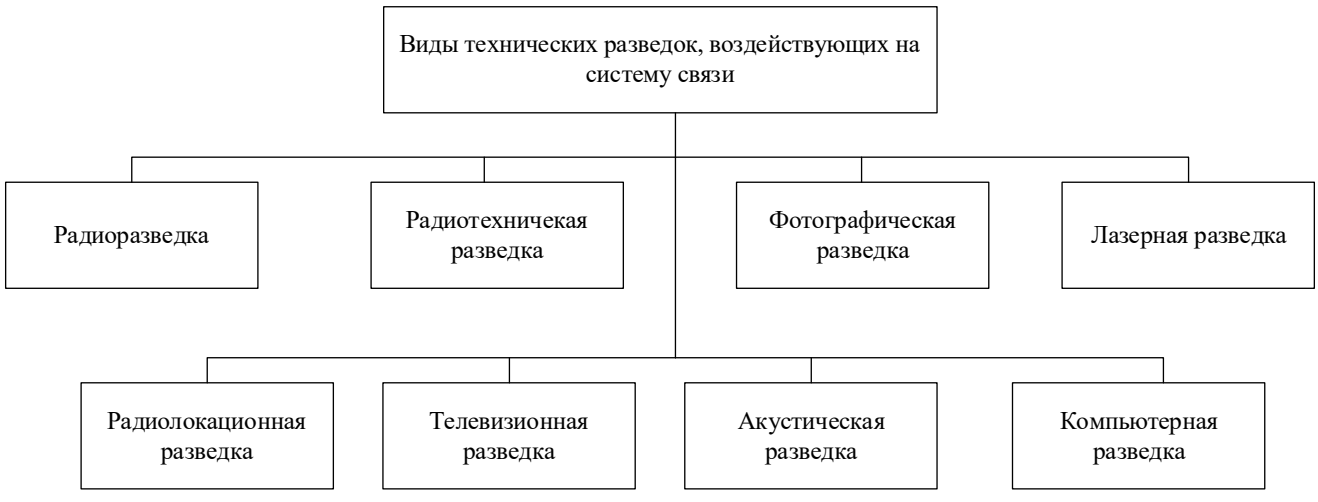


Рис. 1. Виды технических разведок, воздействующих на систему связи

В тактическом звене управления информационно-телекоммуникационная сеть военного назначения (ИТКС ВН) в первую очередь подвергается оптическим видам разведки, радиоразведке и радиотехнической разведке, следовательно, в статье целесообразно рассмотреть методы повышения защищенности ИТКС ВН от данных типов разведки.

Основной задачей оптических видов разведки, которые включают в себя такие виды разведки как фотографическая, лазерная, телевизионная, является вскрытие, местоопределение и установление видовой принадлежности узлов связи и линий связи информационно-телекоммуникационной сети [2]. Методы по повышению защищенности информационно-телекоммуникационной сети военного назначения от оптических видов разведки представлены на рисунке 2.

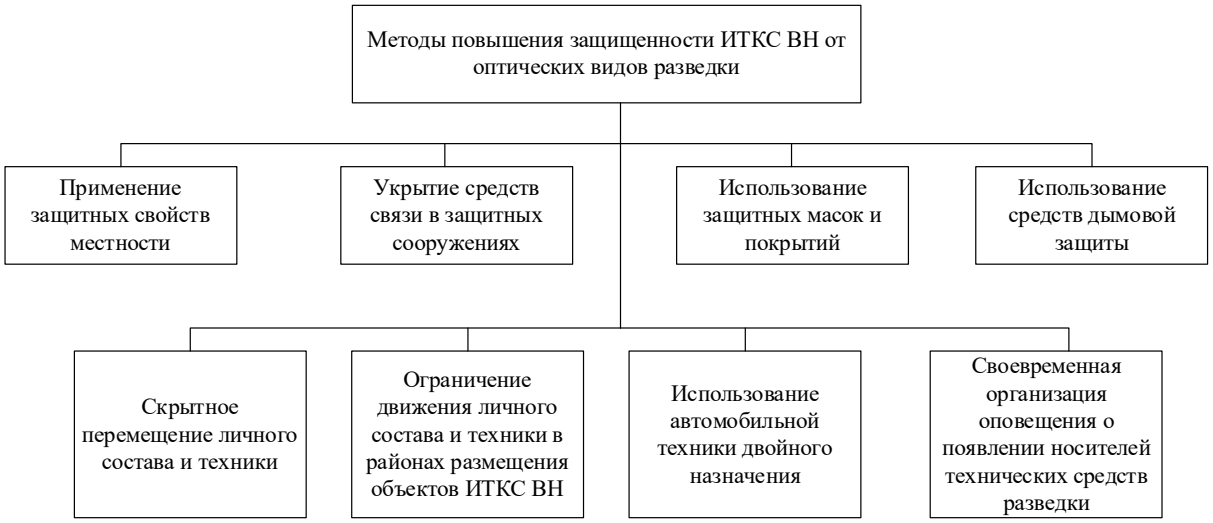


Рис. 2. Методы повышения защищенности ИТКС ВН от оптических видов разведки

Основной задачей радиоразведки и радиотехнической разведки, которые объединяются в радиоэлектронную разведку, является осуществление радиоперехвата информации, циркулирующей в радиосетях и радионаправлениях, обнаружение факта работы радиоизлучающих средств, и определение, по возможности, их местоположения, принадлежности к звену управления [3]. Методы по повышению защищенности информационно-телекоммуникационной сети военного назначения от радиоэлектронных видов разведки представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Методы повышения защищенности ИТКС ВН от радиоэлектронных видов разведки

В целях выработки предложений по повышению защищенности ИТКС ВН от радиоэлектронной разведки предлагается используемые методы разбить на три укрупненные группировки, а именно: методы, направленные на снижение энергетической доступности радиосредств; методы, направленные на снижение частотно-временной доступности радиосредств; методы, направленные на снижение признаковой доступности радиосредств [4]. Предложенные укрупненные группировки, а также их составляющие представлены на рисунке 4.

Практика применения предложений по повышению защищенности ИТКС ВН о радиоэлектронной разведки показала, что:

– применение предложения 1.2 снижает вероятность энергетической доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,4 раза;
– применение предложения 1.3 снижает вероятность энергетической доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,7 раза;
– применение предложения 1.4 снижает вероятность энергетической доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,5 раза;
– применение предложения 1.5 снижает вероятность энергетической доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,25 раза;

– применение предложения 2.2 снижает вероятность частотно-временной доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,2 раза;
– применение предложения 2.3 снижает вероятность частотно-временной доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,7 раза;
– применение предложения 2.4 снижает вероятность частотно-временной доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,4 раза;
– применение предложения 3.1 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,4 раза;
– применение предложения 3.2 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,2 раза;
– применение предложения 3.3 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 3 раз;
– применение предложения 3.4 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,7 раза;
– применение предложения 3.5 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 2 раз;
– применение предложения 3.6 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 2 раз;
– применение предложения 3.7 снижает вероятность признаковой доступности для сил радиоэлектронной разведки до 1,4 раза.

Таким образом, комплексное применение выдвигаемых предложений позволит снизить энергетическую, частотно-временную и признаковую доступность ИТКС ВН для радиоэлектронной разведки противника в несколько раз, а при грамотном использовании, достаточном уровне планирования, высокой обученности личного состава, исправности техники связи до десяти раз, что позволит в целом повысить защищенность информационно-телекоммуникационной сети военного назначения от технической разведки.

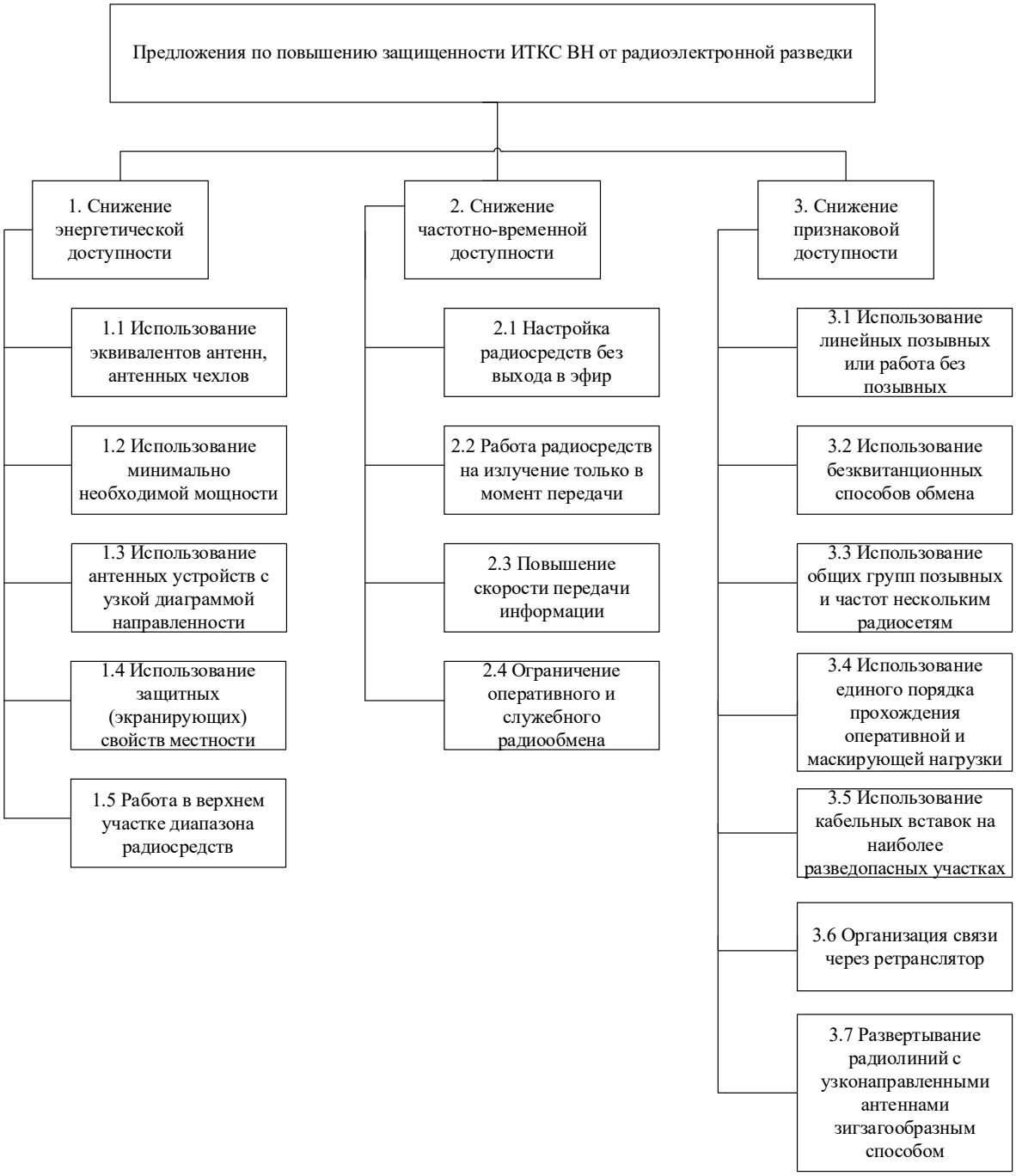


Рис. 4. Предложения по повышению защищенности ИТКС ВН от радиоэлектронной разведки

Список используемых источников

1. Груздев Д. А., Поляков А. А., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С., Скрыков И. А. Инфотелекоммуникационная система специального назначения и система радиоподавления как объект конфликта // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С. 696-699.

2. Назарова О. Ю., Сагдеев А. К., Стахеев И. Г., Титова О. В., Шилина А. Н. Совершенствование методики количественной оценки угроз информационной безопасности

телекоммуникационных систем и сетей // Научно-практический журнал. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 77-84.

3. Дробяскин А. Н., Сагдеев А. К., Суюндукова А. А Методы расширения спектра сигнала для повышения помехоустойчивости линий радиосвязи ИТКС ВН // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. С. В. Бачевского; сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич. СПб.: СПбГУТ, 2019. Т. 4. 708 с. С. 283-287.

4. Новак А. В., Пащенко М. С., Сагдеев А. К., Суюндукова А. А. Применение метода ППРЧ для повышения помехоустойчивости линий радиосвязи ИТКС ВН // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VIII Международная научнотехническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. С. В. Бачевского; сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич. СПб.: СПбГУТ, 2019. Т. 4. 708 с. С. 474-478.

METHODS OF INCREASING THE SECURITY OF A MILITARY INFORMATION AND TELECOMMUNICATION NETWORK FROM TECHNICAL INTELLIGENCE

Vasiliev D., Sagdeev A., Samarkin D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

During a special military operation, a military information and telecommunications network is exposed to enemy technical intelligence, in order to prevent (and/or reduce) the consequences, methods of increasing security are proposed.

Key words: technical intelligence, radio intelligence, military information and telecommunication network

УДК 623.626
ГРНТИ 78.25.41

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ ОТ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ

Р. В. Гордийчук, А. А. Лубянников, А. К. Сагдеев, Д. С. Самаркин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В ходе проведения специальной военной операции система радиосвязи подвергается воздействию системы радиоэлектронного подавления, с целью недопущения (и/или снижению) последствий предложены организационно-технические методы повышения защищенности.

система радиосвязи, радиоразведка, радиоэлектронное подавление

В случае пропадания радиосвязи необходимо выполнить следующие мероприятия:

– понять причину пропадания, для чего перейти в режим аналоговый модуляции. В случае постановки помех в телефоне будет слышен шум высокой интенсивности;
– проверить, не работают ли собственные радиосредства в режиме передачи (проверяется для каждой радиостанции);
– не включать шумоподавление (из-за потери чувствительности).

В случае появления помех одновременно в широком диапазоне частот наиболее вероятно, что противник применяет заградительные помехи (заносимые передатчики помех (ЗПП)) [1]. Как правило, ЗПП устанавливаются возле барьерных рубежей или завалов, блокпостов, а также в местах размещения УС ПУ. ЗПП имеют эффективный радиус работы 300-500 м.

Их обнаружение своими силами затруднительно. При этом для повышения эффективности применения дополнительно могут устанавливаться ЗПП вдоль дорог. Важно понимать, что противник может управлять ими дистанционно. В этом случае необходимо выполнить следующие мероприятия:

– в районе УС ПУ осуществлять поиск и уничтожение забрасываемых передатчиков помех;

– определить зону подавления, для чего:
    – попытаться войти в связь в хвосте (голове) колонны, правее (левее) (не менее чем на 600 м) силами боевого охранения, специально выделенной радиостанции;
    – изменить маршрут, проехать по возможности зону подавления, переместить средство связи правее (левее) (не менее чем на 600 м);
– проверять находящиеся поблизости от зоны пропадания связи (до 1 км) строения на предмет подключения электроснабжения ЗПП;
– поддерживать постоянный радиообмен в ложных и подавленных радиосетях (для рассеивания ресурса передатчиков помех и уменьшения времени работы забрасываемых передатчиков помех, оборудованных автономным источником питания).

В случае появления помех на отдельных частотах наиболее вероятно, что противник использует станции прицельных помех (автоматизированные станции помех, БПЛА). В этом случае необходимо выполнить следующие мероприятия:

– использовать нижнюю и верхнюю часть КВ-диапазона станции комплекса «Акведук» (1,5-2 МГц и 29-30 МГц) ионосферной волной;
– организовать не менее 4-х ложных радиосетей на разных частотах для «рассеивания» ресурса передатчиков помех [2];
– при пропадании связи в режиме ППРЧ дать команду корреспонденту на вхождение в связь в режиме с аналоговой модуляцией, при этом использовать переговорные таблицы;
– не прекращать радиообмен в подавленных радиосетях (по возможности обеспечить постоянную передачу для исключения радиосредства из списка подавления автоматической станцией помех). В случае невозможности постоянного радиообмена осуществлять работу на передачу через каждые 15 секунд с длительностью не менее 30 с;
– осуществлять переход на запасные (скрытые) частоты непосредственно перед выполнением тактических задач (преодолением барьерных рубежей);
– осуществлять одновременную работу на одной частоте «старшей» и «вспомогательной» станции с переходом «старшей» станции на запасную частоту при подавлении основной частоты. «Вспомогательная» станция при этом продолжает работу на основной частоте для введения противника в заблуждение;

– максимально сокращать дистанцию связи, использовать режимы ретрансляции;
– средства связи, используемые для работы с подразделениями (частями), находящимися в глубине боевого порядка, с соседними подразделениями (частями) по фронту необходимо скрывать за искусственными, естественными экранами (броней, кунгом);
– использовать антенны радиостанции комплекса «Азарт» в соответствии с используемым диапазоном частот [3];
– при работе на радиостанции комплекса «Акведук» использовать антенну бегущей волны с противовесами, направленными в сторону корреспондентов;
– при пропадании связи в режиме телефонной радиосвязи использовать режим «слуховой ТЛГ»;
– использовать в качестве ретрансляторов радиостанции средней мощности УКВ-диапазона, размещаемые в тыловых районах;
– организовать скрытые радионаправлении на радиостанциях других типов;
– в условиях радиоподавления использовать возможность радиостанции комплекса «Азарт» работать на прием в режиме однополосной модуляции в диапазоне 1,5-3 МГц (для повышения полезной мощности сигнала – принимать сигналы управления вышестоящего штаба, передаваемые радиостанциями средней мощности);
– использовать сигналы боевого управления, систему сигналов тангентой (определить сигналы заблаговременно). Например**:** «Вы меня слышите?», ответ – двойное нажатие тангенты с промежутком в 2 секунды.

Для увеличения дальности связи при работе на радиостанциях комплекса «Азарт» использовать в качестве ретрансляторов БПЛА и отдельные радиостанции в качестве ретранслятора при размещении на АМУ на высоте от 5 до 10 метров [4]. При применении ретрансляторов учитывать тот факт, что чем ближе организована работа радиосредств к линии соприкосновения войск, тем ниже должен быть поднят ретранслятор (например, среднепересеченная местность – на каждый метр подъема увеличение дальности связи на 1-1,5 км) [5].

Список используемых источников

1. Груздев Д. А., Поляков А. А., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С., Скрыков И. А. Инфотелекоммуникационная система специального назначения и система радиоподавле-

ния как объект конфликта // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С. 696-699.

2. Алехин И. Н., Новиков Н. С., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С. Методика оценки комплекса радиоэлектронного подавления по возможности ведения радиоразведки // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025); сб. науч. ст.: в 3 т. / Под. ред. А. В. Рабина; сост. И. М. Татарникова: СПб.:С ПбГУТ, 2025. Т. 2. 636 с. С. 603-608.

3. Алехин И. Н., Новиков Н. С., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С. Методика оценки возможностей комплекса РЭП по радиоподавлению // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025); сб. науч. ст.: в 3 т. / Под. ред. А. В. Рабина; сост. И. М. Татарникова: СПб.: СПбГУТ, 2025. Т. 2. 636 с. С. 609-614.

4. Григорчук А. Н., Добровольский С. Л., Сагдеев А. К., Самаркин Д. С., Семин А. В. Использование ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Теория и практика применения новых информационных технологий. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции кафедры электротехники, автоматики и метрологии электроэнергетического факультета. Ставропольский государственный аграрный ун-т. 2023. С. 120-128.

5. Кузнецов Д. А., Митрошина П. О., Сагдеев А. К., Семин А. А. Особенности построения радиоканала с беспилотным летательным аппаратом // Труды учебных заведений связи: сб. науч. ст. Т. 2. № 2 / под ред. С. В. Бачевского, М. В. Буйневич, Е. А. Аникевич. СПб.: Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2016. 103 с. С. 82-88.

ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL METHODS OF INCREASING THE SECURITY OF THE RADIO COMMUNICATION SYSTEM FROM ELECTRONIC JAMMING

Gordiychuk R., Lubyannikov A., Sagdeev A., Samarkin D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

During a special military operation, the radio communication system is exposed to an electronic suppression system, in order to prevent (and/or reduce) the consequences, organizational and technical methods of increasing security are proposed.

Key words: radio communication system, radio intelligence, electronic suppression

УДК 621.391
ГРНТИ 49.33.29

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОГО СЕГМЕНТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ КОМПАНИИ

А. В. Ермаков

Филиал НИЦ Телеком в г. Санкт-Петербурге

Телекоммуникационная система высокотехнологичной компании, как правило, содержит два основных сегмента, ориентированных на решение разных задач. Один из таких сегментов, который предлагается называть защищенным, предназначен для поддержки бизнес-процессов, имеющих ряд специфических требований. Для бизнес-процессов такого рода характерны жесткие показатели в части качества предоставления услуг, надежности и живучести защищенного сегмента, информационной безопасности. В статье рассматривается комплекс технических и организационных решений, направленных на обеспечение работы защищенного сегмента в составе телекоммуникационной системы высокотехнологичной компании с заданными требованиями.

телекоммуникационная система, высокотехнологичная компания, защищенный сегмент сети

Введение

Высокотехнологичные компании, как правило, выполняют ряд работ, результаты которых предназначены для использования ограниченным кругом специалистов. Для реализации такой возможности в составе телекоммуникационной системы высокотехнологичной компании (ТСВК) создается защищенный сегмент. Его реализация имеет определенную специфику, которая отличается от открытого сегмента ТСВК. Ниже изложены те особенности, которые характерны для защищенного сегмента ТСВК вне зависимости от направлений деятельности высокотехнологичной компании.

При разработке принципов построения защищенного сегмента ТСВК следует учитывать тот факт, что высокотехнологичная компания может размещаться как в одном здании, так и в нескольких точках, находящихся в границах Российской Федерации. Не исключено также появление площадок в ряде дружественных государств. Данное обстоятельство порождает ряд дополнительных проблем с точки зрения обеспечения заданных требований по информационной безопасности в защищенном сегменте ТСВК.

Пользователи защищенного сегмента ТСВК имеют право доступа в телекоммуникационную систему специального назначения (ТССН). Пользователи открытого сегмента ТСВК могут взаимодействовать только с абонентами сети связи общего пользования (ССОП).

Кроме того, для выполнения приоритетных проектов в защищенном сегменте ТСВК в некоторый момент времени могут потребоваться дополнительные транспортные и/или вычислительные ресурсы. Они, на некоторый период времени, могут заимствоваться из открытого сегмента ТСВК. Для реализации подобной возможности следует разработать соответствующий алгоритм. Он должен учитывать и потребности защищенного сегмента, и возможности открытого сегмента ТСВК.

Модель защищенного сегмента ТСВК

Для анализа особенностей защищенного сегмента уместно рассмотреть модель гипотетической ТСВК в целом. Она приведена на рис. 1 [1]. Предполагается, что с точки зрения принципов реализации аппаратно-программных средств и линейных сооружений комплекс технических средств в обоих сегментах практически идентичен. Исключение составляют сети для Интернета вещей [2], в которых могут быть различия, обусловленные, в основном, соображениями информационной безопасности. Данный факт отмечен разным уровнем окраски соответствующих облаков.

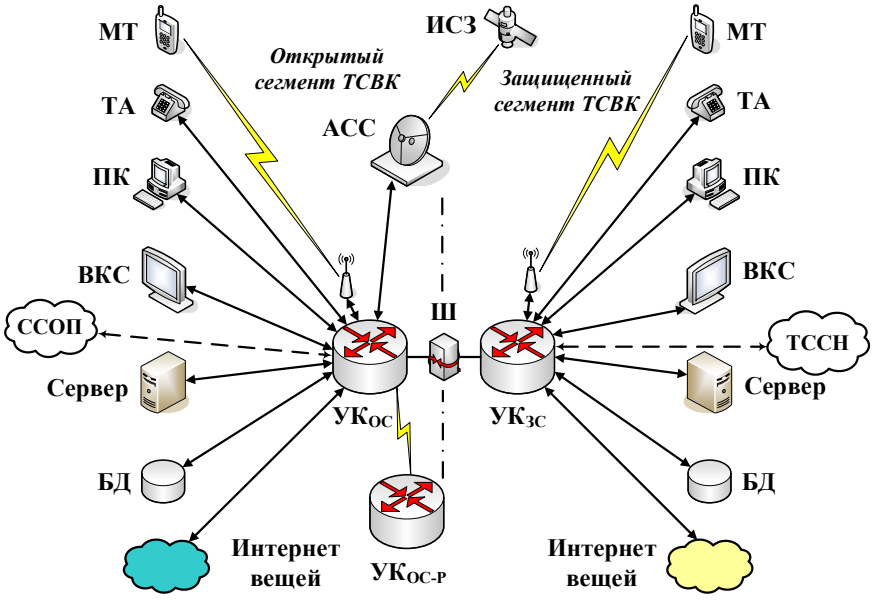


Рис. 1. Модель гипотетической ТСВК

Для модели гипотетической ТСВК на рис. 1 показаны следующие виды технических средств: МТ – мобильный терминал, ТА – телефонный аппарат

(фиксированной связи), ПК – персональный компьютер, ВКС – оборудование для видеоконференцсвязи, БД – база данных, АСС – антенна спутниковой связи, ИСЗ – искусственный спутник Земли, УК – узел коммутации, Ш – шлюз. Нижние индексы при аббревиатуре УК определяют сегменты, в которых они выполняют свои функции. В составе открытого сегмента изображен резервный узел, обозначенный как $УК_{ОС-Р}$.

Шлюз между двумя сегментами ТСВК предназначен для взаимодействия между терминалами сотрудников высокотехнологичной компании. Еще одной важной задачей шлюза становится обмен ресурсами между открытым и защищенным сегментами ТСВК.

Три аспекта функционирования защищенного сегмента ТСВК

Первый аспект функционирования защищенного сегмента ТСВК связан с повышением уровня информационной безопасности. Наряду с традиционными методами обеспечения заданного уровня информационной безопасности в защищенном сегменте ТСВК предлагается использовать дополнительный механизм. Он основан на применении оборудования, названного в [3] конвертором «И/Д». Данное сокращение образовано от связки слов «Изображение – Данные». На рис. 2 показано место введения конвертора «И/Д» в тракт обмена информацией. Подразумевается, что обмен информацией между источником и приемником данных осуществляется посредством трансляции IP-пакетов.

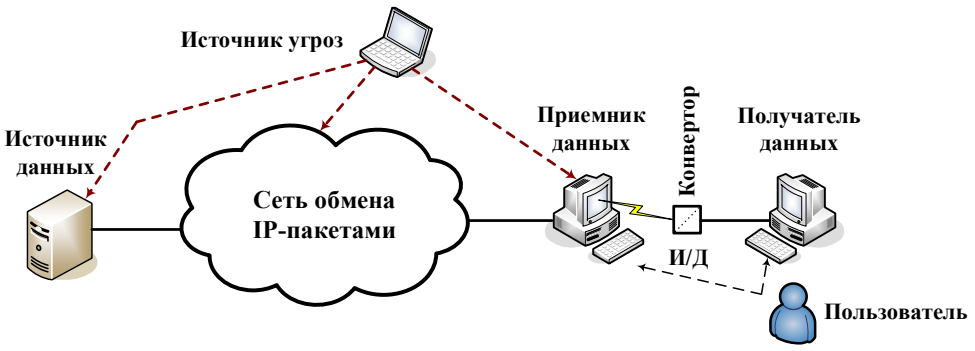


Рис. 2. Введение в тракт обмена информацией конвертора «И/Д»

Получателем данных становится пользователь, который в состоянии визуально оценить достоверность получаемой информации. Эта информация снимается с монитора приемника данных (как правило, персонального компьютера). Она преобразовывается в изображение, которое оценивается пользователем на мониторе получателя данных (им также может стать пер-

сональный компьютер). Конвертор класса «И/Д» не позволяет служебной информации и вредоносным объектам попадать в терминал, названный получателем данных. Этот терминал не должен подключаться к сети обмена данными.

В качестве второго аспекта функционирования защищенного сегмента ТСВК следует назвать возможность обмена ресурсами с открытым сегментом. В публикации [4] изложены принципы обмена ресурсами в сетях производственной связи при возникновении экстраординарных условий. Этот же методологический подход вполне приемлем для реализации процедур обмена транспортными и/или вычислительными ресурсами между двумя сегментами ТСВК.

Если предположить, что задачи, которые решаются в защищенном сегменте ТСВК, имеют более высокую значимость для высокотехнологичной компании, то простейшим решением будет назначение соответствующим IP-пакетам первого приоритета на передачу, коммутацию и обработку. Более сложная процедура заключается в применении гистерезисного управления [5], позволяющего найти разумный компромисс при распределении ресурсов между двумя сегментами ТСВК.

Использование защитных покрытий [6], которые предназначены для минимизации потенциальных утечек информации, рассматривается как третий аспект функционирования защищенного сегмента ТСВК. С этой целью оборудование, устанавливаемое в защищенном сегменте ТСВК, выбирается так, чтобы оно соответствовало заданным требования в части возможных утечек. Важную роль в решении возникающих задач будут играть защитные покрытия.

Заключение

Построение перспективных систем класса ТСВК формирует ряд новых научно-технических задач. К задачам подобного рода относится и комплекс решений, обеспечивающих эффективное функционирование защищенного сегмента ТСВК. Анализ трех аспектов функционирования защищенного сегмента ТСВК позволил сформулировать возможные подходы в части поддержки информационной безопасности как важного фактора надежности и живучести системы производственной связи для высокотехнологичной компании.

Список используемых источников

1. Ермаков А. В. Эволюция телекоммуникационных систем производственной связи // Электросвязь, 2023. № 7. С. 41–47.

2. Росляков А. В., Ваняшин С. В., Гребешков А. Ю., Самсонов М. Ю. Интернет вещей. Самара: ПГУТИ, ООО «Издательство Ас Гард», 2014, 340 с.

3. Ермаков А. В., Соколов Н. А. Метод повышения уровня информационной безопасности за счет использования конвертора «Изображение – Данные» // Информация и космос. 2022. № 4. С. 28–31.

4. Ермаков А. В., Соколов Н. А., Федоров А. В. Использование инфокоммуникационных ресурсов сетей производственной связи в экстраординарных условиях. – Сборник трудов XVIII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», Москва, 27–28 февраля, 2024. С. 190–192.

5. Красносельский М. А. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 1984, 272 с.

6. Ковалева Т. Ю., Ермаков А. В., Ковалева А. Г., Андрющенко М. С. Моделирование и синтез радиопоглощающих материалов для защиты наземной военной техники // Актуальные проблемы защиты и безопасности: материалы всероссийской научно-практической конференции, Том 3. Санкт-Петербург, 2–5 апреля 2012 г. М.: ИД ФГБУ РАРАН, 2012. С. 225–230.

FEATURES OF THE FUNCTIONING OF THE SECURE SEGMENT OF THE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM OF A HIGH-TECH COMPANY

Ermakov A.
Branch of the Scientific Research Center Telecom in St. Petersburg

The telecommunications system of a high-tech company, as a rule, contains two main segments focused on solving different tasks. One of these segments, which is proposed to be called protected, is designed to support business processes with a number of specific requirements. Business processes of this kind are characterized by strict indicators in terms of the quality of service provision, reliability and survivability of the closed segment, and information security. The article considers a set of technical and organizational solutions aimed at ensuring the operation of a secure segment within the telecommunications system of a high-tech company with specified requirements.

Key words: telecommunications system, high-tech company, secure network segment

УДК: 37.091.26:355.23
ГРНТИ: 14.35.07

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

В. В. Загорельский, А. А. Марченков, Д. А. Нарбеков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Современные требования к качеству подготовки офицеров-связи обуславливают необходимость совершенствования методов контроля знаний. В статье рассматриваются ограничения традиционного тестирования и обосновывается переход к интеллектуальному тестированию. Авторами предлагается трехуровневая система компьютерного собеседования на основе нейронных сетей, выполняющих функции классификатора вопросов и оценки ответов с применением предикаторов. Представлена формула интегральной оценки качества знаний с учетом коэффициентов сложности. Делается вывод, что внедрение предложенной методики повышает объективность контроля и сокращает временные затраты при подготовке должностных лиц, ответственных за организацию фельдъегерско-почтовой связи.

тестирование, военное образование, интеллектуальное тестирование, педагогическая диагностика, подготовка офицеров связи

Общеизвестно, что под тестированием в ряде публикаций понимают применение диагностики в различных областях человеческой деятельности. Чаще всего, в образовании, в виде метода педагогической диагностики, когда производится выборка поведения или результата работы, отвечающих принципам объективности, надежности и валидности (достоверности) измерений.

Внедрение в учебный процесс заданий в мастер-тесте, направленных на проверку усвоения теоретических основ организации связи, показало, что приоритетность выборки придавалась заданиям, связанных с пониманием процессов и алгоритмов, происходящих в системах управления и связи и не затрагивало деятельность должностных лиц-организаторов связи [1].

Выделялись 4 основных конструктивных форм тестовых заданий:

– задания в закрытой форме (выбор одного или несколько правильных ответов из ряда предложений);

– задания в открытой форме (заполнение в качестве ответов недостающих знаков, формул, слов, схем и т.д.);
– задания на установление соответствия (в качестве ответа выбирается определение соответствия между элементами двух или нескольких множеств, между визуальной и тестовой информацией, между понятиями и определениями и т.д.);
– задания на конструирование правильной последовательности по одному или нескольким параметрам, в зависимости от ситуации, (понимание логики связи, усвоение процессов управления, организации связи и боевого применения войск связи).

Разработанный комплекс компьютерных мастер-тестов, использующий две первые конструктивные формы тестовых заданий, позволили в рамках тренинговой системы по программе «Дип-обучения» значительно повысить уровень теоретической подготовки обучаемых.

Первые шаги применения современных образовательных технологий, отвечающих макроструктуре построения компьютерных тестирующих программ и включающих три блока формирования: 1) блок, содержащий банк заданий по курсу (теме) дисциплины; 2) блок статистики результатов тестирования с модулем оценки усвоения учебного материала по каждой выделенной контрольной единицы тестирования; 3) блок администрирования для установок различных параметров тестирования (количество заданий, число тестируемых и их данные, контроль времени, критерии оценок и др.) подтвердили достаточность в осуществлении контрольных функций. Но, как показал анализ результатов, явно недостаточным в будущем развитии обучения офицера-связиста нового облика [2].

Предлагаемое в качестве инструмента интеллектуальное тестирование в процессуальном плане обеспечит, на наш взгляд, замену преподавательского опроса – компьютерным собеседованием (коллоквиумом), имеющего информационную полноту, структурную связность, больший охват обучаемым при сокращенном времени обучения (контроля). Кроме того, оценка опроса (простого тестирования) определяется по конечному результату выполнения тестового задания, в то время как при компьютерном собеседовании (коллоквиуме) результат определяется по совокупности оценок базового теста.

Создавая 3-х уровневый режим сложности тестовых заданий, возможен отсев неподготовленных обучаемых уже на ранних стадиях тестирования.

Разработка вариантов заданий для интеллектуального тестирования (ИТ) и автоматизированной проверки их решений достаточно сложный и трудоемкий процесс, связанный с интеллектуальным уровнем знаний.

Для этого потребуется создание логически связанных деревьев и их ветвей в единое целое, имеющих динамическую структуру развития глубинных процессов и явлений в области управления и связи. Логическая связность и динамизм действует за счет ввода нескольких предикаторов (Р), определяющих стратегию интеллектуального тестирования. Например, Р1 предикатор верности ответов, Р2 – предикатор сложности вопроса, Р3 – предикатор достаточности уровня тестирования, и т.д. Ps – предикатор скорости ответов.

Все тестовые задания распределяются по классам, в зависимости от уровня тестирования и их сложности, практическая реализация которых потребует создание двух нейтронных сетей: одна в виде классификаторов вопросов, и другая в виде оценки верности ответов.

Классификатор вопросов развивает все имеющиеся в банке задания на классы вопросов, которые на основе верности ответов тестируемых и тематической близости вопросов, обеспечивают компьютерное собеседование (коллоквиум). Нейронная сеть оценки верности ответов передает анализатору ответ тестируемого на данный вопрос, при положительном результате переводит на следующий уровень (ветвь). Затем процесс продолжается до завершения тестирования.

Оценку качества знаний с учетом числа степеней интеллектуальной сложности (ИС) при тестировании можно рассчитать по формуле:

$$I_i = \frac{K_i}{n_i} \sum_{j=1}^{m} \frac{W_{\text{по}j}}{W_{\text{в}j}} \quad (1)$$

K_i – коэффициент интеллектуальной сложности i числа степени (от 1…);

j – число вариантов заданий (вопросов в задании) от (1....);

n – число серий в тестовых заданиях;

Wвj – число вопросов в j варианте.

При (=3, $К_1+К_2+К_3 = 1,0$, тогда $К_1$ – 0,198; $К_2$ – 0,30, $К_3$ – 0,5; следовательно общая интегральная оценка для измерения будет равна:

$$I_o = \sum_{i=1}^{m} I_i = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2)$$

Удовлетворительно находится в диапазоне: 0,38-0,61; хорошо: 0,61-0,78; отлично: 0,78-1,0 (см. табл. № 1)

С учетом выбора коэффициентов интеллектуальной сложности во взаимосвязи со средним значением шкалы оценок (хорошо) Ф = 1,61 и его обратной величиной можно определить шкалу нижних границ шкалы оценок.

ТАБЛИЦА 1. Оценка качества знаний с учетом числа степеней интеллектуальной сложности

Оценка	Диапазон шкалы определения оценок	Нижние границы оценки
Неудовлетворительно	0,00-0,38	0,00
Удовлетворительно	0,38-0,61	0,38~Ф2
Хорошо	0,61-0,78	0,61=Ф
Отлично	0,78-1,00	0,78~Ф

Поскольку определение уровня знания определение уровня знания (оценки знания) происходит в автоматическом режиме, то при получении положительного ответа (3,4,5) производится выборка следующего вопроса в зависимости от результата предыдущего. В любом случае тестовые задания должны быть просты по форме, не иметь двоякого толкования и, в зависимости сложности содержания, отражать суть рассматриваемого вопроса, темы, раздела, курса, характеризоваться валидностью и надежностью, обладать дифференцирующей способностью при оформлении рейтинговых оценок, а способ ввода ответов – удобен и краток.

Тестирующий должен иметь возможность подтверждения окончания ввода ответа. Тестовые задания вновь не повторяются, а исправление ответа исключается. При задержке ответа (по счетчику времени) задание может считаться невыполненным с получением результата «Тест не сдан».

При положительных ответах тестирования полученный результат завершается резюме – «Тест сдан».

В заключении следует отметить, что реализация интеллектуального тестирования в военном образовании важный и неизбежный процесс развития.

Сложность и масштабность этой работы в определенной степени ограничивается сроками внедрения и востребованностью реального времени. Но поэтапность очевидна, поскольку имеет явные преимущества и базируется на уже созданную систему простого тестирования. Очевидно и то, что применяемый в настоящее время тестирование в виде метода «скачка», когда заданный вопрос и ответ переходит из одной плоскости знаний в другую, иногда без тесной взаимосвязи часто приводит к погрешностям

в оценке знаний, а использование преподавательского труда в проведении индивидуального собеседования ограничен во времени.

Поэтому, только внедрение интеллектуального тестирования в учебный процесс приблизит контроль знания обучаемых к моменту истины. Модуль же расстояния между вопросом и ответом сократится до минимума.

Список используемых источников

1. Зенкина С. В. Методика проведения тестирования. М. Информатика и образования № 12, 2006 г.

2. Арбузов Э. В. «Применение тестирования в образовательном процессе оперативно-тактических дисциплин». С-Пб. ВАС «Психолого- педагогические проблемы военного образования». Сборник НПТ Выпуск № 1, 2005 г.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры Проводной электросвязи и фельдъегерско-почтовой связи, кандидатом технических наук, полковником А. В. Брыдченко.

APPLICATION OF INTELLIGENT TESTING IN THE MILITARY EDUCATION SYSTEM

Zagorelskiy V., Marchenkov A., Narbekov D.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Modern requirements for the quality of signal officer training necessitate the improvement of knowledge control methods. The article examines the limitations of traditional testing and substantiates the transition to intelligent testing. The authors propose a three-level computer-based interview system utilizing neural networks that function as a question classifier and answer evaluator using predicators. A formula for the integral assessment of knowledge quality considering complexity coefficients is presented. It is concluded that the implementation of the proposed methodology increases the objectivity of control and reduces time costs in the training of officials responsible for organizing courier-postal communication.

Key words: testing, military education, intelligent testing, pedagogical diagnostics, signal officer training

УДК 378.633:355.23+ 37.035.6/.7
ГРНТИ 50.11.99

ВОЕННЫЙ УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР КАК СРЕДА ФОРМИРОВАНИЯ ГРАЖДАНСКОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО САМООПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛОДЕЖИ

В. М. Козырев, Ю. Ф. Лашин, А. Н. Музыкантов, А. К. Сагдеев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуется проблема интеграции военно-профессиональной ориентации и гражданско-патриотического воспитания молодежи в условиях военного учебного центра (ВУЦ) при гражданском вузе. На основе обобщения практического опыта ВУЦ при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича раскрывается педагогический потенциал ВУЦ как уникальной образовательной среды. Авторами обосновывается, что военно-профессиональная ориентация, реализуемая с использованием кадровых, материально-технологических и организационных ресурсов ВУЦ, становится эффективным механизмом формирования мотивационного, когнитивного, поведенческого и эмоционально-оценочного компонентов гражданской идентичности. Представлена структурно-функциональная модель данного процесса, определены организационно-педагогические условия ее реализации.

гражданская идентичность, военный учебный центр, профессиональное самоопределение, военно-профессиональная ориентация, педагогическая среда, патриотическое воспитание, социализация молодежи

Введение

В условиях современной геополитической напряженности, усиления информационного противостояния и реализации стратегических национальных приоритетов, закрепленных в указах Президента Российской Федерации, проблема становления гражданской идентичности у молодого поколения приобретает особую значимость. Приоритетной задачей становится воспитание личности, ориентированной не только на достижение профессиональных высот, но и на осознанное служение Родине, готовность к выполнению конституционной обязанности по ее защите. Молодежь, находясь в стадии активного социального и профессионального самоопределения, наиболее восприимчива к различным ценностным ориентациям, что обу-

словливает необходимость целенаправленного педагогического воздействия.

В этой связи военные учебные центры при гражданских вузах становятся важнейшим институтом, объединяющим гражданское и военное образование. Анализ диссертационных исследований последних лет (работы С. В. Алешина, А. Н. Вырщикова, В. А. Тишкова [1, 2, 3]) показывает наличие устойчивого противоречия: с одной стороны, государством сформулирован запрос на подготовку специалистов, сочетающих высокий профессионализм с развитым гражданским самосознанием; с другой стороны, существующая практика военно-профессиональной ориентации в ВУЦ зачастую сводится к практическим задачам, упуская из виду мощный воспитательный потенциал формирования коллективного субъекта, иначе говоря – формирования потребности принадлежности к конкретной государственной общности (формирование гражданской идентичности) [4, с. 456-463].

Цель данной статьи – на основе обобщения педагогического опыта и анализа научной литературы выявить и систематизировать возможности военного учебного центра как среды формирования гражданской идентичности и профессионального самоопределения молодежи в процессе военно-профессиональной ориентации.

Основная часть

Военный учебный центр представляет собой уникальную образовательную среду, где происходит наложение двух векторов социализации: гражданской (через освоение социальных норм и ценностей общества) и профессиональной (через подготовку к военной службе) [5].

В отличие от обычных кафедр, ВУЦ обладает специфическими ресурсами, которые могут и должны быть использованы для формирования гражданской идентичности в процессе военно-профессиональной ориентации. Рассмотрим эти ресурсы подробнее.

Кадровый потенциал. Преподаватели ВУЦ – это офицеры кадра и запаса, обладающие не только глубокими военно-профессиональными знаниями, но и сформированной гражданской позицией, личным опытом служения. В ходе профориентационных встреч с учащимися 9-11 классов школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области (проведено более 100 мероприятий) преподаватели выступают не просто лекторами, а носителями ценностных ориентиров, живыми примерами гражданственности и патриотизма. Их авторитет и личная история служат мощным фактором эмоцио-

нального воздействия, формируя у школьников и студентов мотивацию к подражанию и уважение к военной профессии как к высшему проявлению гражданского долга. Проведенный анализ показывает, что наиболее эффективными являются беседы с учениками 9-10 классов, поскольку именно в этом возрасте происходит активное формирование жизненных планов и профессиональных намерений [2, с. 442].

Материально-технологический потенциал. Уникальная учебно-материальная база ВУЦ, включающая современные образцы вооружения и военной техники, тренажеры-симуляторы с элементами виртуальной и дополненной реальности, позволяет вывести профориентационную работу на качественно новый уровень. Вовлечение школьников в интерактивные занятия, знакомство с высокими технологиями, стоящими на страже безопасности страны, способствует не только росту интереса к конкретным военно-учетным специальностям (когнитивный компонент), но и формирует чувство гордости за мощь и технологическое развитие государства (эмоционально-оценочный компонент). Использование мультимедийных презентаций, информационно-рекламных фильмов, а также возможностей электронно-информационной образовательной среды университета позволяет представить абстрактное понятие «защита Отечества» в конкретных, эмоционально окрашенных образах [2, с. 443].

Потенциал социального партнерства. ВУЦ активно взаимодействует с воинскими частями, военкоматами, ветеранскими организациями, фондами поддержки военнослужащих (например, «Защитники Отечества»). Это позволяет организовывать для молодежи встречи с участниками боевых действий, в том числе выпускниками ВУЦ – героями специальной военной операции. Такое общение персонифицирует образ героя, демонстрирует высшие образцы гражданского поведения и жертвенности, что напрямую работает на формирование поведенческого и мотивационного компонентов идентичности.

Нормативно-символический ресурс. Сама атмосфера военной организации (ношение специальной формы, соблюдение уставных отношений, ритуалы принятия присяги, поднятия государственного флага, участие в торжественных мероприятиях посвященных празднованию дней воинской славы вооруженных сил Российской Федерации и т.д.) погружает студентов не просто в профессию, но и в историко-культурный контекст служения Родине. В исследованиях по педагогике доказано, что включение молодежи

в ритуально-символическую деятельность является мощным фактором эмоционального переживания сопричастности к судьбе страны [6, с. 320].

Содержательно-целевой ресурс. Военно-профессиональная ориентация в ВУЦ не должна пониматься только как агитация за выбор военной профессии. В широком смысле – это процесс формирования готовности к выполнению конституционного долга. Разъяснение учащимся положений статьи 59 Конституции РФ о том, что «защита Отечества является долгом и обязанностью гражданина Российской Федерации», в сочетании с информацией о возможностях получения качественного образования в ведомственном вузе и подготовки по программам офицеров кадра и запаса, формирует целостное понимание единства профессионального и гражданского становления [2, с. 442].

Потенциал интеграции. Сама образовательная модель ВУЦ, где студент одновременно осваивает гражданскую и военную специальности, служит мощным профориентационным примером. Демонстрация успешных выпускников, совмещающих карьеру в телекоммуникационной сфере и службу в рядах Вооруженных Сил РФ, разрушает стереотипы и показывает, что служение Отечество может быть органичной частью современной успешной жизни, а не альтернативной ей.

На основе анализа научных работ по педагогике высшей колы нами разработана **структурно-функциональная модель формирования гражданской идентичности** у студентов ВУЦ в процессе военно-профессиональной ориентации, включающая три взаимосвязанных компонента:

Мотивационно-ценностный компонент – ориентация на развитие у студентов внутренней потребности соотносить свои жизненные планы с интересами общества и государства. Средства реализации: встречи с ветеранами, экскурсии в воинской части, обсуждение героических примеров из современной истории.

Когнитивный компонент – углубленное изучение гуманитарных дисциплин в контексте военной подготовки (военная история, военное право). Важно, чтобы знания не были абстрактными, а проецировались на современную геополитическую реальность. Эффективным методом здесь выступает проектная деятельность (подготовка рефератов и презентаций по истории частей и соединений).

Деятельностно-практический компонент – ядро формирования идентичности. Участие в военно-тактических играх, полевых выходах, волонтерских акциях (помощь семьям военнослужащих, благоустройство во-

инских захоронений) позволяет перевести ценностные ориентации в разряд личностных смыслов и поведенческих паттернов [6, с. 320-321].

Однако исследование существующей практики выявляет ряд проблем. Главная из них – разрыв между воспитательной работой вуза и учебным процессом ВУЦ. Часто студенты воспринимают обучение в военном центе как досадную повинность или способ избежать призыва в армию «срочником». Преодоление этого иждивенческого подхода требует целенаправленной педагогической деятельности по формированию позитивного образа военной службы как почетной гражданской обязанности [3, с. 48-50].

Заключение

Таким образом, военный учебный центр при гражданском вузе обладает значительным педагогическим потенциалом как интегративная среда формирования гражданской идентичности и профессионального самоопределения молодежи. Его уникальность заключается в возможности синтеза профессионального обучения и гражданского воспитания в условиях, приближенных к реальной военной службе. Военно-профессиональная ориентация, реализуемая с использованием кадровых, материально-технологических, нормативно-символических и организационных ресурсов ВУЦ, перестает быть узконаправленной задачей кадрового отбора и превращается в эффективный механизм формирования всех компонентов гражданской идентичности: мотивационного, когнитивного, поведенческого и эмоционально-оценочного.

Проведенный теоретический анализ и обобщение практического опыта позволяют утверждать, что эффективность этого процесса достигается не стихийно, а благодаря реализации специально разработанной педагогической модели. Ключевым условием успеха выступает переориентация военно-профессиональной работы с узко-инструментальных целей (подготовка к службе по контракту) на широкие цели гражданской социализации, где служба Родине предстает как высшая форма гражданского самоопределения.

Перспективной дальнейших исследований может стать разработка научно-методического комплекса профориентационных мероприятий, системно формирующих все компоненты гражданской идентичности у различных возрастных групп молодежи, а также создание диагностического инструментария для оценки уровня сформированности гражданской идентичности у студентов ВУЦ и методических рекомендаций для преподавате-

лей по интеграции гражданских ценностей в содержание военно-профессиональных дисциплин.

Список используемых источников

1. Тишков В. А. Российская идентичность: внутренние и внешние вызовы/ В. А. Тишков // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 456-463.

2. Вырщиков А. Н., Кусмарцев М. Б. Военно-патриотическое воспитание молодежи: теоретико-методологический аспект / А. Н. Вырщиков, М. Б. Кусмарцев. Волгоград: Принт, 2017. 320 с.

3. Алешин С. В. Формирование гражданской идентичности студенческой молодежи в социокультурной среде вуза: дис. … канд. пед. наук. / С. В. Алешин. М., 2018. 185 с.

4. Музыкантов А. Н., Халепа С. Л. Практика формирования гражданской идентичности студентов военного учебного центра / А. Н. Музыкантов, С. Л. Халепа // Актуальные вопросы научных исследований: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Саратов: НОП «Цифровая наука», 2023. С. 440-446.

5. Федеральный закон «О воинской обязанности и военной службе» от 28.03.1998 № 53-ФЗ (ред. От 04.08.2023).

6. Иванов П. С. Педагогические условия адаптации студентов к обучению в военных учебных центрах / П. С. Иванов // Инновации в образовании. 2022. № 8. С. 45-52.

MILITARY TRAINING CENTER AS AN ENVIRONMENT FOR THE FORMATION OF CIVIL IDENTITY AND PROFESSIONAL SELF-DETERMINATION OF YOUTH

Kozyrev V. Lashin U., Muzykantov A., Sagdeev A.
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article explores the problem of integrating military professional orientation and civic-patriotic education of young people in the conditions of a military training center (MTC) at a civilian university. Based on the generalization of the practical experience of the MTC of the St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruyevich, the pedagogical potential of the MTC as a unique educational environment is revealed. The authors substantiate that military-professional orientation, implemented using the personnel, material, technological, and organizational resources of the Military Training Center, becomes an effective mechanism for forming the motivational, cognitive, behavioral, and emotional-evaluative components of civic identity. A structural and functional model of this process is presented, and the organizational and pedagogical conditions for its implementation are determined.

Key words: civic identity, military training center, professional self-determination, military professional orientation, pedagogical environment, patriotic education, and youth socialization

АВТОРЫ СТАТЕЙ

АБРАМОВА Нина Ивановна — научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, HIAbram@yandex.ru

АБРАМЯН Геннадий Владимирович — доктор педагогических наук, профессор кафедры вычислительных систем и информатики Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, профессор кафедры информационных технологий и электронного обучения Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, abrgv@rambler.ru

АВДЯКОВ Владимир Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, avdyakov.va@sut.ru

АВРАМЕНКО Владимир Семенович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, vsavr@yandex.ru

АГЕЙЧИК Никита Олегович — аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ageichik.no@sut.ru

АДОНИН Леонид Сергеевич — кандидат биологических наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, adonin.ls@sut.ru

АКИМОВ
Сергей Викторович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, akimov.sv@sut.ru

АЛЕКСАНДРОВ
Вадим Анатольевич
старший преподаватель кафедры электропроводной связи и фельдъегерско-почтовой связи военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, aleksandrov@sut.ru

АЛЕКСАНДРОВ
Илья Владимирович
инженер научно-исследовательской лаборатории радиоконтроля и электромагнитной совместимости Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, aleksandrov.iv@sut.ru

АЛЕКСЕЕНКО
Ирина Альбертовна
кандидат педагогических наук, доцент кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ialekseenko@sut.ru

АЛЛИ
Рашид Амидуевич
аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, alli.ra@sut.ru

АЛЬ-АНСИ
Ахмед Мохаммед Ахмед
аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, a.al-ansi@sut.ru

АНДРЕЕВА
Татьяна Алексеевна
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, andreeva.ta@sut.ru

АНТИПИН
Борис Маврович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, antipin.bm@sut.ru

АНТРОПОВ Максим Викторович — аспирант кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, antropov.mv@sut.ru

АРСИРИЙ Алла Ивановна — кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, arsirii.ai@sut.ru

АТАЯН Ануш Михайловна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, dataeconomics@sut.ru

БАБИН Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, babin.nn@sut.ru

БАГАЕВ Егор Сергеевич — аспирант и преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bagaev.es@sut.ru

БЕЛОУС Константин Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bk@sut.ru

БЕРДЫЕВА Оразбиби Пирмухаммедовна — преподаватель кафедры информационных систем Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана, bibi.ber.va@gmail.com

БЕРЕЗКИН Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, berezkin.aa@sut.ru

БИЛЯТДИНОВ Камиль Закирович — доктор технических наук, кандидат военных наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Информатика и информационная безопасность», профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, inib@pgups.ru

БОБРОВСКИЙ Андрей Владимирович — преподаватель кафедры беспроводных технологий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bobrovskii.av@sut.ru

БОНДАРЕНКО Игорь Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bondarenko.ib@sut.ru

БОРИСОВ Максим Геннадьевич — аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, borisov.mg@sut.ru

БОРИСОВ Сергей Викторович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, borisov.sv@sut.ru

БРАЗОВСКИЙ Глеб Русланович — ассистент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, brazovskii.gr@sut.ru

БРИТАЕВА Ольга Хаджи-Муратовна — старший преподаватель кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, britaeva.oh@sut.ru

БРЮШИНИН Александр Юрьевич — инженер кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bryushinin.ay@sut.ru

БУЛАТОВА
Анастасия Борисовна
старший преподаватель кафедры иностранных языков Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bulatova.ab@sut.ru

БУСНЮК
Андрей Олегович
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru

БУЧАТСКИЙ
Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии, директор института магистратуры, Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, abuchatsky@sut.ru

БЫЛИНА
Мария Сергеевна
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bylina.maria@sut.ru

ВАСИЛЬЕВ
Дмитрий Николаевич
начальник кафедры радио, радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vasilev@sut.ru

ВАСИЧКИН
Сергей Сергеевич
аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vasichkin.ss@sut.ru

ВЕРХОВА
Галина Викторовна
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, verkhova.gv@sut.ru

ВИВЧАРЬ
Роман Михайлович
кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vivchar.rm @sut.ru

ВИНИЦКИЙ
Михаил Александрович
инженер-исследователь лаборатории кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, m.vinitsky@sut.ru

ВИНОГРАДОВ
Евгений Михайлович
кандидат технических наук, доцент, инженер научно-исследовательской лаборатории радиоконтроля и электромагнитной совместимости Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vinogradov.em@sut.ru

ВИНОГРАДОВ
Петр Юрьевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, power@sut.ru

ВИТКОВА
Лидия Андреевна
кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vitkova.la@sut.ru

ВЛАДИМИРОВ
Сергей Сергеевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vladimirovs@sut.ru

ВЛАДИМИРОВА
Елена Сергеевна
старший преподаватель кафедры информационных технологий и компьютерных систем Севастопольского государственного университета, ESVladimirova@sevsu.ru

ВЛАДЫКО
Андрей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектронных систем и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vladyko@sut.ru

ВОЛКОВ
Артем Николаевич
доктор технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, volkov.an@sut.ru

ВОЛОСТНЫХ
Виктор Анатольевич
кандидат военных наук, доцент, научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, ra1alo@mail.ru

ВОЛОШИНОВ
Денис Вячеславович
доктор технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, voloshinov.dv@sut.ru

ВОЛЧИК
Олеся Владимировна
кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ovolchik.ov@sut.ru

ВОЛЫНКИН
Павел Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, volinkin.pa@sut.ru

ВОЛЬФСОН
Михаил Борисович
кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, volfson.mb@sut.ru

ВОРОБЬЕВ
Павел Владимирович
научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, gsg.1991@mail.ru

ВОРОНЧУК
Виктор Иосифович
преподаватель Военной академии связи им. Маршала Советского союза С. М. Буденного, iskova@yandex.ru

ВТОРОВ
Олег Павлович
инженер кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vtorov.op@sut.ru

ВТОРЫХ
Виталий Станиславович
аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vtorykh.vs@sut.ru

ВУ
Тхе Зует
аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vutheduyet99@gmail.com

ВЯЗЬМИН
Алексей Юрьевич
кандидат философских наук, доцент кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vyazmin.au@sut.ru

ВЯЛЬШИН
Эмиль Саитович
аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vyalshin.emil@sut.ru

ГАЛАКТИОНОВ
Илья Владимирович
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Оптические и квантовые коммуникации, руководитель сектора НИО «Квантовый Центр» Московского технического университета связи и информатики, ilya.galaktionoff@gmail.com

ГАЛУЗОВ
Евгений Вячеславович
начальник отдела внедрения аппаратных платформ АО «ПКБ «РИО», GaluzovE@pkb-rio.com

ГВОЗДКОВ
Игорь Вячеславович
старший преподаватель кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gvozdkov.iv@sut.ru

ГЕЛДИМЫРАДОВА
Майса Кыясовна
аспирант кафедры радиосвязи и радиотехнических систем Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана, geldimyradovam2020@gmail.com

ГЕХТ
Антон Борисович
кандидат исторических наук, доцент, заведующий кафедрой истории и регионоведения Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, geht.ab@sut.ru

ГИЛАВОГИ Мишель — аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gilavogi.m@sut.ru

ГЛАГОЛЕВ Сергей Федорович — кандидат технических наук, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Glagolev.Sergey@sut.ru

ГЛУШАНКОВ Евгений Иванович — доктор технический наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, glushankov.ei@sut.ru

ГОЛУБЕВ Юрий Николаевич — начальник факультета автоматизированных систем управления Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, golubew.yurij2015@yandex.ru

ГОЛЬДИБАЕВ Константин Владимирович — генеральный директор АО «ПКБ «РИО», goldibaevk@pkb-rio.com

ГОНЧАРОВ Роман Константинович — аспирант научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики Национального исследовательского университета ИТМО, rkgoncharov@itmo.ru

ГОРДИЙЧУК Руслан Викторович — начальник цикла – старший преподаватель военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gordijchuk@sut.ru

ГОРОБЦОВ Илья Александрович — старший преподаватель кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gorobcov.ia@sut.ru

ГОРЫНЦЕВ Андрей Арсеньевич — аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, goryntsev.aa@sut.ru

ГРЕКОВ
Константин Борисович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, grekov.kb@sut.ru

ГРИГОРЬЕВ
Егор Андреевич
инженер-программист АО «НПП «Радар ммс», grigorev.ea@sut.ru

ГУБИН
Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, angubin@sut.ru

ГУМИНСКИЙ
Олег Андреевич
аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, guminskii.oa@sut.ru

ГУНИНА
Елена Викторовна
кандидат педагогических наук, доцент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gunina.ev@sut.ru

ДЕМИДОВ
Николай Александрович
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, demidov.na@sut.ru

ДЕНИСОВА
Юлия Вячеславовна
старший преподаватель кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, denisova.uv@sut.ru

ДЕРКАЧ
Алексей Евгеньевич
адъюнкт кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, alder2000@inbox.ru

ДЕТКОВА
Вера Михайловна
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, detkova.vm@sut.ru

ДМИТРИЕВА
Виктория Викторовна
старший преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dmitrieva.vv0@gmail.com

ДМИТРИЕВА
Юлия Сергеевна
старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dmitrieva@sut.ru

ДМИТРИКОВ
Владимир Федорович
доктор технических наук, профессор кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, k112_electron@sut.ru

ДОЛГАЯ
Нина Александровна
старший преподаватель кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dolgaya.na@sut.ru

ДОЛГОПОЛОВ
Александр Леонидович
ведущий инженер ОАО «Ровер», 9993888@mail.ru

ДОЛМАТОВА
Ольга Александровна
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru

ДОЦЕНКО
Сергей Эдуардович
аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dotsenko.sergey@sut.ru

ДУКЛАУ
Владимир Владимирович
ведущий инженер кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vladimir.duklau@sut.ru

ДУСТАЛЕВ
Евгений Владимирович
инженер-исследователь лаборатории кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dustalevev@sut.ru

ЕГОРОВА
Марина Александровна
кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, egorova2.ma@sut.ru

ЕДЕМСКАЯ
Екатерина Дмитриевна
аспирант лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, ekaterina.edemskaya51@gmail.com

ЕЛАГИН
Василий Сергеевич
кандидат технических наук, и. о. декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем, доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, v.elagin@sut.ru

ЕРМАКОВ
Алексей Валентович
кандидат экономических наук, доцент, начальник отдела Филиала НИЦ Телеком им. М. И. Кривошеева в Санкт-Петербурге, ermakov-it@yandex.ru

ЕРМАКОВА
Татьяна Вячеславовна
старший преподаватель кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, itpi@sut.ru

ЕФИМЕНКО
Владислав Владимирович
инженер кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, efimenko.vv@mail.ru

ЗАВАЛИШИН
Андрей Юрьевич
доктор социологических наук, профессор кафедры истории и регионоведения Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zavalishin.aiu@sut.ru

ЗАГОРЕЛЬСКИЙ Владимир Валерьевич — преподаватель кафедры проводной электросвязи и фельдъегерско-почтовой связи военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zagorelskij@sut.ru

ЗАДБОЕВ Вадим Александрович — младший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, zadboev89@mail.ru

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Александрович — аспирант кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zaitsev.da@sut.ru

ЗАЙЦЕВА Зинаида Викторовна — кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zaitch13@sut.ru

ЗЕНЕВИЧ Андрей Олегович — доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи, a.zenevich@bsac.by

ЗИКРАТОВ Игорь Алексеевич — доктор технических наук, декан факультета кибербезопасности Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zikratov.ia@sut.ru

ЗИКРАТОВА Татьяна Викторовна — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий Военно-морской академии им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова, ztv64@yandex.ru

ИВАНОВ Денис Вадимович — кандидат технических наук, доцент института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, ivanov_dv@spbstu.ru

ИГУМЕНОВ Александр Юрьевич — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ведущий инженер отдела интеграции телекоммуникационных решений Московского физико-технического института, инженер-исследователь ООО «Т8», igumenov.au@mipt.ru

ИЛЬИН
Ярослав Александрович
аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ilin.ya@sut.ru

ИСАКОВ
Александр Вячеславович
кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, isakov.av@net.sut.ru

КАНАЕВ
Андрей Константинович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, kanaevak@mail.ru

КАТАСОНОВА
Галия Рузитовна
кандидат технических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, katasonova.gr@sut.ru

КАЧНОВ
Андрей Владимирович
аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kachnov.av@sut.ru

КВАША
Надежда Владимировна
кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kvasha.nv@sut.ru

КИСЕЛЕВ
Алексей Донославович
доктор физико-математических наук, доцент научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики Национального исследовательского университета ИТМО, adkiselev@itmo.ru

КИСЕЛЕВА
Анастасия Владимировна
старший преподаватель кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kiseleva.av@sut.ru

КИСЕЛЁВ
Николай Николаевич
ассистент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kiselev.nn@sut.ru

КОБИЛЬНЯК Арина Алексеевна — преподаватель Центра иностранных языков «Радостный английский», arina.kob@mail.ru

КОВАЛГИН Юрий Алексеевич — Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kowalgin@sut.ru

КОВАЛЕВ Игорь Станиславович — кандидат военных наук, доцент, доцент Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, iskova@yandex.ru

КОЗЛОВА Ольга Александровна — старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kozlova.oa@sut.ru

КОЗЫРЕВ Виталий Михайлович — преподаватель военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kozyrev@sut.ru

КОЛЕСНИКОВ Олег Вячеславович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Оптические и квантовые коммуникации, декан факультета Сетевая инженерия Московского технического университета связи и информатики, o.v.kolesnikov@mtuci.ru

КОМАРОВ Иван Ильич — аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, komarov1.ii@sut.ru

КОРЖИК Валерий Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korzhik.vi@sut.ru

КОРНЮШКИН Дмитрий Александрович — аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kornushkin.da@sut.ru

КОРОБОВ Сергей Александрович — кандидат психологических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, serkor67@sut.ru

КОРОВИН Константин Олегович — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича, korovin.ko@sut.ru

КОРОТИН Владимир Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korotin.ve@sut.ru

КОСМАЧЕВ Алексей Алексеевич — аспирант Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, преподаватель кафедры информационной безопасности киберфизических систем Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», a.kosmachev@hse.ru

КОСОВ Павел Валерьевич — старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kosov.pv@sut.ru

КОТЕНКО Игорь Витальевич — доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник и руководитель лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, профессор факультета безопасности информационных технологий Национального исследовательского университета ИТМО, ведущий научный сотрудник исследовательского центра в сфере искусственного интеллекта «Сильный искусственный интеллект в промышленности», ivkote1@mail.ru

КОЧЕРГИНА Ольга Викторовна — кандидат технических наук, заведующий кафедрой радио и информационных технологий Белорусской государственной академии связи, o.kochergina@bsac.by

КРАВЕЦ Елена Валентиновна — кандидат технических наук, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kravec.ev@sut.ru

КРАСОВ Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, krasov.av@sut.ru

КРЫЛОВ Андрей Альбертович — кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, krylov.aa@sut.ru

КРЮКОВА Елена Сергеевна — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, e.kkrukovaa69@yandex.ru

КУБАЛОВА Анна Рудольфовна — кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kubalova.ar@sut.ru

КУЗЕНОВ Сергей Ризабекович — кандидат технических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru

КУЗЬМИНА Анна Владиславовна — старший преподаватель кафедры иностранных языков, Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч- Бруевича, kuzmina.av@sut.ru

КУЗЬМИНА Дарья Денисовна — аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kuzmina.dd@sut.ru

КУФЕЛЬД Андрей Станиславович — инженер кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kufeld.as@sut.ru

КУЦЕВ Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника и инфокоммуникационные технологии» Кыргызского государственного университета им. И. Раззакова, evgeny230285@mail.ru

КУЧЕРЯВЫЙ Александр Игоревич — аспирант кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), can4oyc@list.ru

КУЧЕРЯВЫЙ Андрей Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, akouch@sut.ru

КУШНИР Дмитрий Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kushnir.dv@sut.ru

КЮНЕР Андрей Павлович — аспирант Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, kunerandrey@mail.ru

ЛАБКОВСКАЯ Римма Яновна — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, labkovskaia.ria@sut.ru

ЛАНДА Александр Эдуардович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, landa.ae@sut.ru

ЛАПШИН Алексей Сергеевич — аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, lapshin.as@sut.ru

ЛАШИН Юрий Федорович — преподаватель военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, lashin@sut.ru

ЛЕТУЧИЙ Василий Алексеевич — аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, letuchii.va@sut.ru

ЛИВШИЦ Александр Иосифович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, livshits@sut.ru

ЛИКАРЬ Александр Иванович — старший преподаватель кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, likar.ai@sut.ru

ЛИКОНЦЕВ Алексей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Likontsev.an@sut.ru

ЛИМАНЦЕВА Елена Владимировна — адъюнкт кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, limantseva@mail.ru

ЛИПАТНИКОВ Валерий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, lipatnikovanl@mail.ru

ЛИТВИНОВ Владислав Леонидович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vlitvinov@sut.ru

ЛОБЕЕВ
Дмитрий Петрович
аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, lobeev1@mail.ru

ЛУБЯННИКОВ
Александр Андреевич
кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, lubyannikov.aa@sut.ru

ЛУТОВИНОВА
Екатерина Юрьевна
доцент, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dataeconomics@sut.ru

ЛЮБИМОВ
Александр Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, lyubimov.ag@sut.ru

ЛЯЩУК
Михаил Зиновьевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, HIAbram@yandex.ru

МАКАРЕНКО
Денис Владимирович
адъюнкт Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, nsdivdeni@yandex.ru

МАКАРОВ
Владимир Васильевич
доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makarov.vv@sut.ru

МАКАРОВ
Леонид Михайлович
кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makarov.lm@sut.ru

МАКОЛКИНА Мария Александровна — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makolkina.ma@sut.ru

МАНВЕЛОВА Наталья Евгеньевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, manvelova.ne@sut.ru

МАРЧЕНКОВ Алексей Алексеевич — старший преподаватель кафедры проводной электросвязи и фельдъегерско-почтовой связи военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, marchenkov@sut.ru

МАСЛОВА Анна Андреевна — аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, bloodyelis@yandex.ru

МАТЮХИНА Татьяна Владимировна — кандидат технических наук, доцент, заместитель декана факультета радиотехнологий связи по учебной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rsr@sut.ru

МЕДВЕДЕВ Валерий Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, medvedev@sut.ru

МЕДВЕДЕВ Сергей Алексеевич — кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, medvedev1.sa@sut.ru

МЕЖЕВОВ Павел Александрович — старший преподаватель кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mezhevov.pav@mail.ru

МЕЛЕХОВ Кирилл Витальевич — кандидат технических наук, преподаватель Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, kirill_melehov@bk.ru

МЕЛЬНИКОВ Игорь Владимирович — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер отдела интеграции телекоммуникационных решений, ассистент кафедры общей физики Московского физико-технического института, melnikov.iv@mipt.ru

МЕЛЬНИКОВ Максим Владиславович — ассистент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, melnikov.mv@sut.ru

МЕЛЬНИКОВ Павел Сергеевич — аспирант кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, melnikov.ps@sut.ru

МЕСЯЦЕВ Марк Андреевич — инженер НИО «Квантовый центр» Московского технического университета связи и информатики, mark20032510@yandex.ru

МЕШКОВ Александр Владимирович — кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, meshkov.av@sut.ru

МЕЩЕРЯКОВ Данила Евгеньевич — ассистент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mecherikov.de@sut.ru

МИТЯНИН Сергей Александрович — аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, руководитель отдела разработки ООО «СМА-РТ», s.mityanin@gmail.com

МИХАЙЛОВ Василий Дмитриевич — ассистент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mvd@sut.ru

МИХАЙЛОВ
Роман Алексеевич
аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mihailov.ra@sut.ru

МОХОВА
Анастасия Александровна
ассистент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mokhova.aa@sut.ru

МОШАК
Николай Николаевич
доктор технических наук, профессор кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ius@sut.ru

МУЗЫКАНТОВ
Алексей Николаевич
заместитель начальника военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, muzykantov@sut.ru

МУСАЕВА
Татьяна Вагиф кызы
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, musaevatv@sut.ru

НАЛИМОВ
Константин Георгиевич
аспирант института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, nalimov1984@mail.ru

НАРБЕКОВ
Дмитрий Александрович
начальник цикла – старший преподаватель цикла фельдъегерско-почтовой связи кафедры проводной электросвязи и фельдъегерско-почтовой связи военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, narbekov.da@sut.ru

НАУМЧИК
Анастасия Сергеевна
инженер лаборатории квантовых коммуникаций Национального исследовательского университета ИТМО, asnaumchik@itmo.ru

НГУЕН Суан Нгок — аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, nguen.sn@sut.ru

НЕРОВНЫЙ Артём Викторович — старший преподаватель кафедры истории и регионоведения Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, nerovnyi.av@sut.ru

НИКИТИН Юрий Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, k112_electron@sut.ru

НИКИФОРОВА Светлана Александровна — аспирант кафедры экономики данных, заместитель начальника отдела планирования финансово-хозяйственной деятельности Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича nikiforovasa@sut.ru

НИЯЗГУЛЫЕВА Айна Меретдурдыевна — заведующий кафедрой радиосвязи и радиотехнических систем, преподаватель Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана, a.niyazgulyyeva@gmail.com

НОСЕНКО Анна Андреевна — ведущий экономист ООО «Энерговыбор», Anna.andreevna.nosenko@gmail.com

ОРЛОВ Виталий Владимирович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры математики, инженерной и компьютерной графики Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, artictvetal1987@gmail.com

ОСТРОУМОВА Юлия Сергеевна — доктор педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой биологической и медицинской физики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова, sinklit@mail.ru

ПАВЛОВ
Федор Федорович
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru

ПАВЛОВА
Елена Васильевна
кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pavlova.ev@net.sut.ru

ПАВЛОВСКАЯ
Анна Александровна
аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, birukova1.aa@sut.ru

ПАВЛОВСКИЙ
Михаил Валентинович
аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pavlovskii.mv@sut.ru

ПАНИХИДНИКОВ
Сергей Александрович
кандидат военных наук, доцент, заведующий кафедрой экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, panihidnikov.sa@sut.ru

ПАНКОВ
Арсений Владимирович
аспирант и ассистент кафедры информационной безопасности компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pankov.av@sut.ru

ПАРАМОНОВ
Александр Иванович
доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, paramonov@sut.ru

ПАРАНИЧЕВ
Андрей Викторович
старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, paranichev.av@sut.ru

ПАРАЩУК Игорь Борисович — Заслуженный изобретатель РФ, Почетный работник сферы образования РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, shchuk@rambler.ru

ПАЧИН Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pachin.av@sut.ru

ПЕЛИН Артем Александрович — адъюнкт кафедры общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, PelinVUC@yandex.ru

ПЕРЕВОЗНИК Юрий Яковлевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, perevoznik.uy@sut.ru

ПЕРЕДИСТОВ Евгений Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, peredistov.eu@sut.ru

ПЕРЕС-КАЛЬДЕРОН РОДРИГЕС Дарио Альфонсо — кандидат технических наук, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, peres.krda@sut.ru

ПЕТРОВА Екатерина Дантесовна — старший преподаватель кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича petrova.ed@sut.ru

ПИГАРЕВ Николай Дмитриевич — аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pigarev.nd@sut.ru

ПИЛИКИНА
Елена Анатольевна
старший преподаватель кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pilikina.ea@sut.ru

ПЛОТНИКОВ
Павел Владимирович
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, plotnikov.pv@sut.ru

ПОДГОРНАЯ
Елена Анатольевна
кандидат экономических наук, доцент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, podgornaya.ea@sut.ru

ПОЛЯКОВА
Елена Валериевна
старший преподаватель кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, e.v.poliakova@sut.ru

ПОСОХОВА
Ольга Алексеевна
преподаватель кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, posokhova.oa@sut.ru

ПОТАЕНКОВА
Ксения Юрьевна
преподаватель Центра иностранных языков «Радостный английский», potaenkova.ku@sut.ru

ПРАСОЛОВ
Александр Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, prasolov.alex@gmail.com

ПРОШИН
Федор Алексеевич
кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, fedorproshin@gmail.com

ПУЧКОВ
Дмитрий Борисович
кандидат философских наук, доцент кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, puchkov.db@sut.ru

РАКОВСКИЙ Олег Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rakovskii.ov@sut.ru

РОЗЫЕВ Ишангулы — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана, isangulyrozy54@gmail.com

РЫЖИКОВА Татьяна Аркадьевна — старший преподаватель кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ryzhikova.ta@sut.ru

РЫЛОВ Евгений Александрович — кандидат технических наук, генеральный директор АО «НПО «Завод «Волна», rylov79@mail.ru

РЮТИН Константин Евгеньевич — аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rutin.ke@sut.ru

РЯБИКОВ Дмитрий Сергеевич — аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ryabikov.ds@sut.ru

САВИЩЕНКО Николай Васильевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, snikaspb@mail.ru

САГДЕЕВ Александр Константинович — кандидат технических наук, доцент кафедры радио, радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sagdeev@sut.ru

САЕНКО Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, ibsaen@mail.ru

САЖИНА Александра Владимировна — адъюнкт кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного sashasazhina@yandex.ru

САЛИТА Андрей Сергеевич — аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, salita.as@sut.ru

САМАРКИН Денис Сергеевич — начальник цикла – старший преподаватель военного учебного центра Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, samarkin@sut.ru

САРАФАННИКОВ Виталий Семенович — старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, sarafannikovs@mail.ru

САХАРОВ Дмитрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zss_ibks@sut.ru

СЕЙИТНЕПЕСОВ Чары — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиосвязи и радиотехнических систем Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана, ch.seyitnepesow@gmail.com

СЕЛЕЗНЕВ Андрей Васильевич — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела военно-технической информации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, andrsel@mail.ru

СИМОНИНА Анна Александровна — старший преподаватель кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, simonina.aa@sut.ru

СИМОНИНА Ольга Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, olga.simonina@sut.ru

СИНИЛЬНИКОВ Александр Михайлович — кандидат технических наук, главный инженер научно-технического центра спутниковых систем связи, радиомониторинга и вещания Филиала НИЦ Телеком им. М. И. Кривошеева в Санкт-Петербурге, sinilam01@gmail.com

СКОРЫХ Марк Андреевич — старший преподаватель кафедры информационной безопасности компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, skorykh.ma@sut.ru

СЛУЦКИЙ Михаил Григорьевич — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ekon_up@sut.ru

СМАГЛИЕНКО Татьяна Георгиевна — кандидат технических наук, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, smaglienko.tg@sut.ru

СМИРНОВА Валерия Сергеевна — старший бизнес-аналитик консалтинговой компании ООО «Смарт Архитектс», sms1503@mail.ru

СМОРОДИН Геннадий Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, smorodin.gn@sut.ru

СОКОЛОВ Виктор Андреевич — ведущий инженер отдела интеграции телекоммуникационных решений Московского физико-технического института, sokolov.va@mipt.ru

СОКОЛОВ Игорь Всеволодович — ассистент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sokolov.iv@sut.ru

СОРОКИН Андрей Валерьевич — заместитель генерального директора – главный конструктор АО «ПКБ «РИО», sorokin_a_v@mail.ru

СОТНИКОВ
Александр Дмитриевич
доктор технических наук, профессор кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, adsotnikov@sut.ru

СПИРИДОНОВ
Даниил Петрович
аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, spiridonov.dp@sut.ru

СТАРИКОВ
Владимир Владимирович
старший преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, starikov.vv@sut.ru

СТОРОЖУК
Николай Леонидович
кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, storozhuk.nl@sut.ru

СТУРМАН
Владимир Ицхакович
доктор географических наук, профессор, профессор кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sturman.vi@sut.ru

СУЕТИН
Алексей Юрьевич
аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, suetin.au@sut.ru

ТАМБОВЦЕВ
Глеб Ильич
аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tambovcev.gi@sut.ru

ТАТАРЕНКОВ
Дмитрий Александрович
старший преподаватель кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч- Бруевича, tatarenkov.da@sut.ru

ТАФИНЦЕВ Кирилл Евгеньевич — аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tafintsev.ke@sut.ru

ТЕРЕХ Ирина Леонидовна — аспирант Белорусской государственной академии связи, i.tereh@bsac.by

ТИШКОВ Антон Олегович — ассистент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tishkov.ao@sut.ru

ТКАЧЕВ Дмитрий Федорович — кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, dimas.portnoy@inbox.ru

ТКАЧЕВА Елена Васильевна — старший преподаватель кафедры иностранных языков Санкт- Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч- Бруевича, tkacheva.ev@sut.ru

ТОПОРОВСКИЙ Владимир Владимирович — старший преподаватель кафедры Оптические и квантовые коммуникации, инженер НИО «Квантовый центр» Московского технического университета связи и информатики, toporovskii_v@mail.ru

ТУЧКЕВИЧ Артём Никитович — аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tuchkevich.an@sut.ru

УРОКОВ Антон Дилшодович — аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, urokov.ad@sut.ru

УСС Владимир Станиславович — кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, uss.vs@sut.ru

УССАЕВ Баймухаммет Говшутмухаммедович — соискатель степени кандидата технических наук кафедры радиосвязи и радиотехнических систем Института телекоммуникаций и информатики Туркменистана, umyt.ussayev@gmail.com

УХОВ Андрей Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), aauhov@etu.ru

ФАМ Ван Бач — аспирант кафедры беспроводных технологии и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fam.vb@sut.ru

ФАМ Конг Куен — аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fam.kk@sut.ru

ФАМ Хю Хунг — аспирант факультета безопасности информационных технологий Национального исследовательского университета ИТМО, phamhung.hanoivietnam@gmail.com

ФЕДОРЕНКО Ирина Николаевна — кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ekon_up@sut.ru

ФЕДОРОВ Александр Владимирович — начальник отдела Филиала НИЦ Телеком им. М. И. Кривошеева в Санкт-Петербурге, fedorovav@nic-t.ru

ФЕДОРОВ Сергей Игоревич — аспирант и ассистент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fedorov1.si@sut.ru

ФЕДОРОВА Алина Владимировна — кандидат экономических наук, начальник отдела аспирантуры и докторантуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, asp@sut.ru

ФЕДОРОВА Ольга Михайловна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Санкт- Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fedorova2.om@sut.ru

ФЕДЮШИН Владимир Борисович — старший преподаватель кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru

ФЁДОРОВ Сергей Леонидович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sergey.fedorov@sut.ru

ФИЛИППОВ Феликс Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fvfilippov@sut.ru

ФОКИН Григорий Алексеевич — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fokin.ga@sut.ru

ФРАЗ Алексей Вячеславович — аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fraz.av@sut.ru

ХАНИН Самуил Давидович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, khanin.sd@sut.ru

ХИТРИН Сергей Ионович — старший преподаватель кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dataeconomics@sut.ru

ХИТРИНА Ирина Юрьевна	кандидат психологических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dataeconomics@sut.ru
ХОАНГ Вьет Тунг	аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, khoang.vt@sut.ru
ХОАНГ Куанг Туан	аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, khoang.kt@sut.ru
ХРЕНОВ Андрей Александрович	аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, hrenov.aa@sut.ru
ЦЫПНЯТОВ Валерий Борисович	Почетный работник высшего профессионального образования РФ, кандидат военных наук, доцент, начальник кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, zvb097@mail.ru,
ЧЕБЫКИН Василий Александрович	кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sar@sut.ru
ЧЕНСКИЙ Александр Александрович	аспирант кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, chenskii.aa@sut.ru
ЧЕРНЫШОВ Александр Сергеевич	аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч Бруевича, chernyshov.as@sut.ru

ЧЕЧУЛИН Андрей Алексеевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, andreych@bk.ru

ЧИТАНАВА Алексей Игоревич — аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, chitanava.ai@sut.ru

ЧУДНОВ Александр Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры робототехники и технологий искусственного интеллекта Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, chudnow@yandex.ru

ШАБАНОВ Александр Павлович — старший преподаватель кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, aps@sut.ru

ШАБРОВА Елена Витальевна — инженер кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Shabrova.ev@sut.ru

ШАМСИЕВ Бахтияр Газиевич — кандидат технических наук, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, shamsiev.bg@sut.ru

ШАРАФИСЛАМОВ Андрей Антонович — инженер-конструктор ООО «Брайтэлек», Московского технического университета связи и информатики a.sharafislamoff@yandex.ru

ШАРИКОВ Павел Иванович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sharikov.pi@sut.ru

ШАРИХИНА Юлия Валерьевна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sharihina.uv@sut.ru

ШЕВЧЕНКО Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zss_ibks@sut.ru

ШЕРЕМЕТ Никита Викторович — аспирант и инженер кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sheremet.nv@sut.ru

ШИЛКОВ Владимир Ильич — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономической безопасности производственных комплексов Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, vi.shilkov@urfu.ru

ШИЯН Андрей Анатольевич — кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, shiyan.aa@sut.ru

ШУМАКОВ Павел Петрович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, shumackov_pp@sut.ru

ЩЕРБАКОВ Игорь Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, sherbakov.ib@sut.ru

ЩЕТИНИНА Дарья Александровна — ассистент кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, shetinina.da@sut.ru

ЭЛЬ САБАЯР ШЕВЧЕНКО Нидал	старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ius@sut.ru
ЮРКИН Юрий Викторович	кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, yvyur@mail.ru
ЮЮКИНА Татьяна Игоревна	кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, iuiukina.ti@sut.ru
ЯКОВЛЕВ Виктор Алексеевич	доктор технических наук, профессор кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, yakovlev.va@sut.ru
ЯРОВОЙ Роберт Владимирович	научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, nadzar@yandex.ru

66-Я НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА, НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ И АСПИРАНТОВ (НТК ППС 2026)

Сборник научных статей

Научное издание

Верстка
М. О. Мотыгина
Корректура
Д. Н. Яшугин
Дизайн логотипа Г. И. Юрьев
Подписано в печать 09.05.2026
Объем 78,5 усл.-печ. л.

Объединенная редакция рецензируемых научных изданий СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22, корп. 1



СПбГУТ)))