ЭС ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ПО ПРОВОДНОЙ И РАДИОСВЯЗИ, ТЕЛЕВИДЕНИЮ, РАДИОВЕЩАНИЮ

07 | 2026

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

СЕТИ СВЯЗИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ЗЕРКАЛЬНЫЕ МИРЫ – СЕТЕВАЯ МЕТАВСЕЛЕННАЯ 2.0

11

ЭКОНОМИКА ДАННЫХ: СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

24

ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

IoT-СИСТЕМА ДЛЯ ЗАХВАТА АУДИОТРАФИКА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

63

ISNN 0013-5771

МЕТРАНОМ

база данных перенесенных номеров

Переходи к любому оператору со своим любимым номером!

bdpn.ru

Преимущества портала МеТраНом

- **Онлайн-сравнение тарифных планов различных операторов**
  Выбери лучший вариант, исходя из своих потребностей в минутах, SMS, Интернете
- **Карта зон покрытия сетями связи**
  Узнай, у какого оператора в твоем регионе качество связи лучше
- **Сервис проверки номера**
  Определи, к какому оператору связи и к какому региону относится номер

Условия перехода к другому оператору



1.

Вы являетесь владельцем номера, договор оформлен на ваше имя*



2.

Ваш номер** из того же региона, где осуществляется перенос



3.

Номер не заблокирован, на нем нет задолженности***

Важно!

* Паспортные данные в договоре с мобильным оператором должны соответствовать текущим паспортным данным. Если у вас изменились паспортные данные, то перед подачей заявления обновите их у своего оператора

** Ранее номер не переносился, или с момента последнего переноса прошло более 60 дней

*** Погасить текущую задолженность необходимо за 3 дня до фактического переноса номера

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

2 **Климов Д.А., Девяткин Е.Е., Жильченко А.А., Тимофеев В.Н., Мухин Е.Е.**
Перспективы применения широкополосных технологий в цифровой профессиональной подвижной радиосвязи

СЕТИ СВЯЗИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

11 **Бородин А.С., Май К.Х., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е.**
Зеркальные миры – сетевая метавселенная 2.0

ЭКОНОМИКА ДАННЫХ: СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

24 **Елагин В.С., Редругина Н.М., Савельева А.А.**
Экспериментальная оценка алгоритма выбора узлов хранения при выполнении операции записи с репликацией данных в распределенной телекоммуникационной инфраструктуре

35 **Климов Д.А., Афанасьев Р.В.**
Особенности построения СКС для современных дата-центров

41 **Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Козлов В.П., Морозова У.К., Гайдамака Ю.В.**
Метод динамического переключения узлов для повышения энергоэффективности сети интегрированного доступа и транзита

50 **Бабкин В.А., Строганова Е.П., Шагров Н.А.**
Методика формирования репрезентативного банка видеоданных для мониторинга пакетных сетей

ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

63 **Горбачева Л.С., Ким З.В., Назаров Д.В., Чуева А.А., Кучерявый А.Е.**
IoT-система для захвата аудиотрафика и сегментированной передачи данных с использованием машинного обучения

75 **Хоанг Н.Ф., Парамонов А.И.**
Метод выбора каналов в гетерогенной сети интернета вещей

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

85 **Моченов А.А.**
Определение условий обеспечения ЭМС сетей ТВ-вещания и 5G/IMT-2020 (NR) в диапазоне частот ниже 1 ГГц

CONTENTS

2 KLIMOV D.A., DEVYATKIN E.E., ZHILCHENKO A.A., TIMOFEEV V.N., MUKHIN E.E.
Prospects for the use of broadband technologies in digital professional mobile radio communication

11 BORODIN A.S., MAI C.H., VOLKOV A.N., MUTHANNA A.S.A., KOUCHERYAVY A.E.
Mirror worlds – network metaverse 2.0

24 ELAGIN V.S., REDRUGINA N.M., SAVELEVA A.A.
Experimental evaluation of a storage node selection algorithm for write operations with data replication in a distributed telecommunication infrastructure

35 KLIMOV D.A., AFANASYEV R.V.
Features of structured cabling system design for modern data centers

41 BESCHASTNYI V.A., OSTRIKOVA D.Yu., KOZLOV V.P., MOROZOVA U.K., GAIDAMAKA Y.V.
A method of dynamic node switching to improve energy efficiency in NR IAB systems

50 BABKIN V.A., STROGANOVA E.P., SHAGROV N.A.
Method of representative video data bank creating for monitoring packet networks

63 GORBACHEVA L.S., KIM Z.V., NAZAROV D.V., CHUEVA A.A., KOUCHERYAVY A.E.
IoT-system for capturing audio traffic and segmented data transmission using machine learning

75 HOANG N.P., PARAMONOV A.I.
Channel selection method in a heterogeneous Internet of Things network

85 MOCHENOV A.A.
Determination of the conditions for providing EMC for TV broadcasting and 5G/IMT-2020 (NR) networks in the frequency range below 1 GHz

ISSN 0013-5771
ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ. 2026, No 7. 1-92

Главный редактор: А.С. Аджемов, д.т.н.
Зам. главного редактора: Л.О. Мырова, д.т.н.

Редакционная коллегия:
А.С. Бородин, к.т.н., к.п.н
Е.Е. Володина, д.э.н.
В.В. Витязев, д.т.н.
В.А. Григорьев, д.т.н., (шеф-редактор)
В.А. Ефимушкин, к.ф.-м.н.
О.А. Иванов, к.воен.н.
С.В. Кизима, д.т.н.
Р.В. Киричек, д.т.н.
В.Б. Крейнделин, д.т.н.
А.Е. Кучерявый, д.т.н.
Е.А. Кучерявый, д.т.н.
Д.А. Климов, к.т.н.
Н.А. Кузнецов, академик РАН
Н.В. Лемешко, д.т.н.
С.Л. Мишенков, д.т.н.
А.Г. Назейкин, к.э.н.
Н.П. Резникова, д.э.н.
Ю.М. Сподобаев, д.т.н.
В.А. Стрелец, к.т.н.
Б.Г. Хаиров, д.э.н.
Д.С. Чиров, д.т.н.
Б.М. Шабанов, чл.-корр. РАН

Генеральный директор: К.В. Фролов

Над номером работали:
Е.А. Волынкина, Л.О. Мырова, О.В. Дорошкевич

Дизайн и верстка: Е.О. Горожанкина, С.В. Сухарев

В соответствии с решением Президиума ВАК Минобрнауки России журнал «Электросвязь» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук **(vak.minobrnauki.gov.ru)**

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ No ФС77-45919 от 22.07.2011

Адрес редакции: 105064, город Москва, ул. Казакова, д. 16а стр. 1.
Тел.: +7 (495) 645-0607
E-mail: info@elsv.ru
Сайт: www.elsv.ru
Телеграм: electrosvyazmagazine

Учредители: Региональное содружество в области связи, Международная академия связи, Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, ООО «Инфо-Электросвязь»

Сдано в набор 6.07.2026 Подписано в печать 29.07.2026
Печать офсетная. Формат 60 × 90 × 8.
Усл. кр.-отт. 364 800. Уч.-изд. л. 9,5. Усл. печ. л. 19.

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИХМ»
115487, Москва, ул. Нагатинская, д. 16А
Тел.: +7(968)906-40-87
E-mail: tipografia@cniihm.ru; www.cniihm.ru

Тираж 500 экз.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.
© ООО «Инфо-Электросвязь». Подписные индексы по каталогам: «Пресса России» — 41411, «Урал-Пресс» — 41411

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

Перспективы применения широкополосных технологий в цифровой профессиональной подвижной радиосвязи

Д.А. Климов, ФГАУ НИЦ Телеком, заместитель генерального директора по научной работе, доцент, к.т.н.; klimovda@nic-t.ru
Е.Е. Девяткин, ФГАУ НИЦ Телеком, директор НТЦ, к.э.н.; devyatkinee@nic-t.ru
А.А. Жильченко, ФГАУ НИЦ Телеком, начальник отдела; zhilchenkoaa@nic-t.ru
В.Н. Тимофеев, ФГАУ НИЦ Телеком, заместитель начальника отдела; timofeevvn@nic-t.ru
Е.Е. Мухин, ФГАУ НИЦ Телеком, инженер; muhinee@nic-t.ru

УДК 621.396.7 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.001

Аннотация. *В статье рассматриваются перспективы применения широкополосных технологий в системах цифровой профессиональной подвижной радиосвязи Российской Федерации. Проводится обоснование выбора стандарта LTE, сравниваются варианты задействования широкополосных технологий: переход на исключительно широкополосные решения или создание конвергентной модели, обеспечивающей совместную работу с существующими узкополосными системами. Обосновываются преимущества мультистандартных терминалов. Особое внимание уделено способам внедрения широкополосных технологий, в том числе с применением модели MVNO и сервиса MCPTT и с учетом международного опыта по строительству систем обеспечения общественной безопасности и оказания помощи при бедствиях PPDR. Делается вывод о целесообразности поэтапного внедрения гибридной архитектуры как сбалансированного решения для организации связи в условиях повышенных требований к безопасности и надёжности, например, при обеспечении деятельности субъектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации.*

Ключевые слова: *профессиональная подвижная радиосвязь, сертификация, компетенции, аутентификация, совместимость, испытательная зона, широкополосная связь, LTE.*

Для цитирования: *Климов, Д.А. Перспективы применения широкополосных технологий в цифровой профессиональной подвижной радиосвязи / Д.А. Климов, Е.Е. Девяткин, А.А. Жильченко и др. // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 2-10.*

ВВЕДЕНИЕ

Возросшие требования федеральных органов исполнительной власти (ФОИВ) и других ключевых пользователей к профессиональной подвижной радиосвязи (ППР) определяют острую необходимость модернизации сетей ППР с акцентом на передачу информации с параметрами, свойственными современным широкополосным технологиям. Заказчикам нужны комплексные решения, предусматривающие не только голосовые вызовы, но и обмен видеоинформацией, данными телеметрии, организацию единого управления сетями связи и возможность администрирования абонентских терминалов. Применение широкополосных протоколов в системах ППР, в том числе построенных на базе оборудования комплекса национальных стандартов «Цифровая профессиональная подвижная радиосвязь» (ЦППР, DMR-RUS) [1–3], представляется обоснованным и стратегически важным направлением, поскольку способствует существенному технологическому развитию отрасли связи и определяет перспективы дальнейшего совершенствования единой национальной платформы радиосвязи, создаваемой в соответствии с поручением Правительства Российской Федерации от 18.08.2022 № ДЧ-П10-13872.

Использование широкополосных технологий в сетях ЦППР позволит выйти на принципиально новую ступень развития, реализуя конвергентный подход, подразумевающий архитектурное соединение в единой инфраструктуре двух стандартов: узкополосного ЦППР и широкополосного LTE (Long-Term Evolution). При этом сохраняются высокие показатели конфиденциальности и отказоустойчивости, необходимые в работе различных государственных структур, и одновременно обеспечивается оперативность обмена информацией. Унификация архитектуры ЦППР позволит добиться синергетического эффекта, вызванного соединением преимуществ и компенсацией недостатков сигнально-кодовых конструкций с узкой и широкой полосой канала. Такая конвергентная система ЦППР сможет поддерживать в едином коммуникационном пространстве следующие важнейшие функции [4–6] (рис. 1):

Рисунок 1
Преимущества конвергентной системы связи



1) поддержка групповых и индивидуальных голосовых вызовов с гарантированным временем установления соединения MCPTT (Mission Critical Push-to-Talk);

2) поддержка передачи мультимедийных данных, в том числе видеосвязи;

3) поддержка служб спутниковой навигации и геопозиционирования;

4) поддержка взаимодействия между системами связи различных ФОИВ;

5) поддержка механизмов управления качеством обслуживания и приоритизацией трафика QoS (Quality of Service);

6) обеспечение высокой надёжности;

7) обеспечение авторизованного доступа;

8) обеспечение опциональной конфиденциальности данных;

9) масштабируемость системы связи.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СТАНДАРТА LTE ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЦППР

Анализ международного опыта показал, что в развитых странах мира в основном реализована единая инфраструктура связи для всех экстренных служб (полиция, пожарные, скорая помощь, городские службы спасения и пр.) с использованием единого цифрового стандарта. Такой подход реализован в Европе (в частности, в Германии и Франции) с помощью создания систем обеспечения общественной безопасности и оказания помощи при бедствиях (Public protection and disaster relief, PPDR) [7].

Системы PPDR представляют собой специализированную инфраструктуру связи, основной принцип которой заключается в обеспечении функциональной совместимости профессионального оборудования, как узкополосного, так и широкополосного, используемого различными службами. Каждый вновь прибывший в зону бедствия портативный связной терминал должен иметь возможность работать под управлением местной базовой станции (БС). Такой подход значительно снижает затраты на создание и эксплуатацию системы связи.

В зависимости от используемого радиоинтерфейса и архитектуры системы связи, можно выделить три основных класса PPDR:

1. Узкополосные системы ППР – представляют собой традиционные решения, базирующиеся на аналоговых или цифровых стандартах с шириной канала до 25 кГц. К данной категории относятся системы DMR (Digital Mobile Radio), dPMR (digital Private Mobile Radio) и TETRA (Terrestrial Trunked Radio). Эти системы характеризуются высокой энергоэффективностью абонентского оборудования, расширенным покрытием при малой мощности передатчика, а также возможностью работы в прямом режиме (direct mode operation) без БС. Узкополосные системы оптималь-

ны для передачи голосовой связи и низкоскоростных данных (статусные сообщения, данные форм), однако не поддерживают передачу мультимедийного контента высокой разрешающей способности.

2. Транкинговые системы PPDR в целом представляют собой вариант той же узкополосной системы, но усложненной, со множеством БС и возможностью динамического распределения частотных ресурсов между пользователями. По этой причине, фактически являясь узкополосными системами, в международной классификации они выделены в отдельный класс. В отличие от конвенциональных систем, где каждому каналу соответствует фиксированная группа абонентов, транкинговая система использует пул частот и автоматически назначает свободный канал при инициации вызова. Это обеспечивает эффективное использование спектра и возможность обслуживания большего числа пользователей. Стандарты TETRA и P25 (Project 25 для Северной Америки) являются основными транкинговыми решениями в сегменте PPDR. Транкинговые системы поддерживают расширенные функции: групповые вызовы, приоритизацию трафика, шифрование на уровне канала, а также возможность работы в режиме изолированной БС (isolated base station, IBS) при потере связи с ядром сети.

3. Широкополосные системы на базе LTE/5G (broadband PPDR, BB-PPDR) предназначены для передачи высокоскоростных данных, видеопотоков в реальном времени, телеметрии и мультимедийного контента. Широкополосные системы требуют значительных объемов спектра (от 5 до 30 МГц на одну сеть), обеспечивают высокие скорости передачи данных (до сотен Мбит/с), но имеют меньшую зону покрытия БС по сравнению с узкополосными системами и характеризуются повышенным энергопотреблением у абонентского оборудования. Эти системы базируются на стандартах 3GPP (Release 14-20) с поддержкой критически важных услуг MCx (Mission Critical Services), в том числе MCPTT (Mission Critical Push-To-Talk), MCPTX (Mission Critical Push-To-X), MCVideo, MCData [8]. Важнейшей особенностью этих сервисов является автономный режим работы (off-network) без использования сетевой инфраструктуры. Устройства автоматически переходят в автономный режим при потере сети. Связь осуществляется в прямом режиме, минуя БС, с использованием прямого канала связи, создаваемого по технологии ProSe (Proximity Services). В автономном режиме поддерживается «поздний вход» (позднее подключение к групповому вызову), сохраняются механизмы приоритизации, ограничения вещания по времени для отдельно взятого пользователя, возможности идентификации, определения местоположения и т.д. Кроме того, сервисы MCx обладают инструментами защиты данных [9]. В частности, перспективными представляются решения по так называемому аппаратному ускорению криптографических операций с обеспечением безопасности на лету (on-the-fly) без существенной нагрузки на основное ядро процессора.

Интересным техническим решением для организации бесшовного радиообмена информацией в конвергентных сетях является реализованная в ряде стран технология сквозной диспетчеризации в системах PPDR, базирующаяся на объединении пользователей узкополосных сетей и абонентов с терминалами PoC (Push-to-Talk over Cellular), когда сообщения передаются через инфраструктуру сетей сотовой связи или Wi-Fi с применением инкапсуляции данных в пакеты VoIP (Voice over IP).

Согласно Отчету ITU-R M.2377-2 «Цели и требования радиосвязи для PPDR», содержащемся в Рекомендациях МСЭ-R M.2015-1 [10], в перспективе узкополосные услуги PPDR (например, критически важные сеансы речевого вызова и низкоскоростной передачи данных) могут обеспечиваться с помощью широкополосных систем. Однако на текущем этапе развития технологий наблюдается гибридный подход к созданию систем PPDR, при котором узкополосные системы (TETRA, DMR) используются для голосовой связи и обеспечения надежности, а широкополосные (LTE/5G) – для передачи данных и мультимедийного контента.

Таким образом, с учетом международного опыта эффективным решением по расширению возможностей систем ЦППР представляется использование технологии LTE, поскольку она поддерживает реализацию сервисов уровня MCx, включая сервис профессиональной голосовой связи MCPTT и перспективный сервис по передаче любой информации MCPTX, механизмы приоритизации трафика QoS, протоколы технологии PoC, инструменты для аутентификации, управления доступом и шифрованием. Реализация перечисленных служб позволит реализовать обмен информацией с соблюдением всех требований, предъявляемых к ППР.

Благодаря широкому распространению на территории Российской Федерации и высокой доступности инфраструктуры, применение решений LTE в системах ЦППР позволит значительно ускорить переход с традиционных узкополосных решений на конвергентные системы, соединяющие в себе преимущества радиосигналов с широкой и узкой полосой, обеспечив при этом минимальные затраты на такую трансформацию, а также поэтапность перехода на новые средства без потери функциональности радиосетей [11].

Согласно Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации [12], до 2030 г. большинство операторов мобильной связи перейдут с 3G на эф-

фективные и современные технологии 4G/LTE и 5G. К концу 2025 г. свыше 80% абонентов сотовой связи уже переориентировались на технические средства, совместимые с LTE, а одной из приоритетных задач по обеспечению национального контроля и устойчивости единой сети электросвязи Российской Федерации, в соответствии с [12], является разработка и производство отечественной электронной компонентной базы для абонентских терминалов 4G/LTE и 5G. Следует учитывать и то, что архитектура LTE позволяет обеспечить плавный переход от сетей третьего поколения к сетям четвёртого, а в дальнейшем и пятого поколения – 5G [13–15].

Использование LTE в системах ЦППР окажет стимулирующее воздействие на ход работ по созданию единой национальной платформы радиосвязи в интересах органов исполнительной власти, а конвергентные решения могут быть использованы в обеспечении работы различных служб экстренного реагирования как в режиме повседневной деятельности, так и в условиях повышенной готовности, а также при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

СПОСОБЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ LTE В РАБОТЕ СИСТЕМ СВЯЗИ СТАНДАРТА ЦППР

В контексте использования широкополосных технологий в работе систем ЦППР возможны два архитектурных подхода: полный переход на LTE и применение комбинированной модели, сохраняющей в себе компоненты узкополосной связи.

Первый подход – отказ от стандартов узкополосной связи и полноценный перенос сервисов в стандарт LTE – представляется нецелесообразным. Хотя этот способ дает пользователям все преимущества широкополосной связи, но он также привносит и характерные для широкополосной связи недостатки: энергозатратность, подверженность помехам, дефицит частотного ресурса, меньшая, чем у узкополосного сигнала, дальность работы. Кроме того, для реализации такого перехода необходимо полностью заменить весь парк оборудования из-за его несовместимости с узкополосными устройствами. При этом будет утрачено основное преимущество узкополосных решений – реализация самого востребованного режима работы – прямой связи между абонентами, обеспечивающего высокую оперативность взаимодействия. В отличие от этих решений, для обеспечения функционирования систем стандарта LTE требуется наличие/развертывание сложной и дорогостоящей инфраструктуры БС.

Реализовать связь с унаследованными системами узкополосной ЦППР при таком сценарии будет возможно только с помощью шлюзования, конвертируя данные из трафика узкополосных сигнально-кодовых конструкций в IP-пакеты. При этом передача ресурсоёмких данных и медиафайлов на узкополосные устройства будет невозможна даже с использованием шлюзов. Такая архитектура, кроме того, потребует централизованного управления на уровне ядра сети.

В этой связи реализацию широкополосных технологий в ЦППР целесообразно осуществлять с использованием комбинированной модели, сочетающей в себе преимущества широкополосных и узкополосных систем.

Такое решение позволит:

1) дополнить стандартные услуги ЦППР возможностями широкополосных сервисов (видеонаблюдение для контроля опасных зон и технологических процессов, передача различных телеметрических данных, обмен фотоинформацией и др.);

2) внедрить систему единого администрирования абонентов конвергентной радиосети посредством диспетчерских приложений, тем самым обеспечив единое управление абонентами и согласованность их действий;

3) реализовать на практике совместные динамические группы, имеющие в составе абонентов сетей ЦППР и LTE, при этом обеспечивая единую иерархию приоритетности вызовов.

Экосистема конвергентной сети представлена на рис. 2. Ее основа – конвергентное ядро. За счет ядра поддерживается интеграция единой базы абонентов с сетями разных стандартов, общее управление, маршрутизация трафика во всей экосистеме. Через шлюз взаимодействия возможен обмен информацией с системами больших данных, мониторинга, сетью связи общего пользования (ССОП) и т.п. Оперативность и единство управления обеспечиваются за счет системы диспетчеризации.

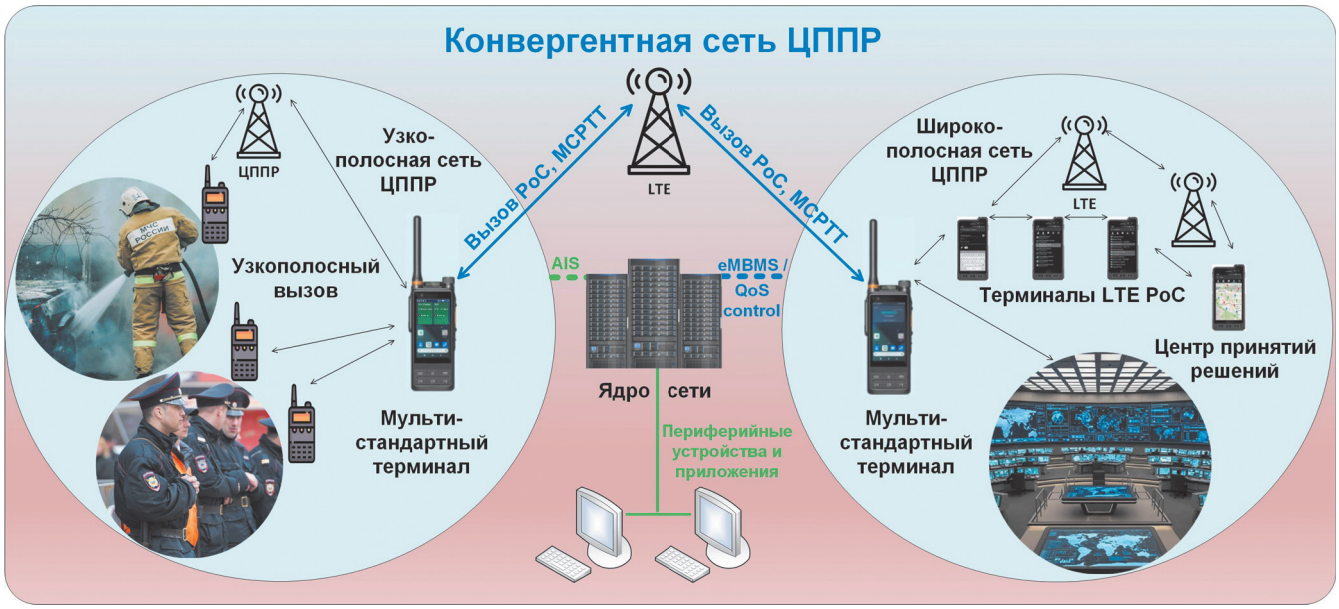
Применяемая архитектура позволит сегментировать передачу информации по возможностям модулей: голосовую связь будет возможно обеспечить как посредством узкополосной сети, так и с помощью сетей LTE (например, применяя программную платформу критической связи MCPTT), в то время как передача ресурсоёмких данных полностью будет осуществляться в широкополосной сети. Такое распределение позволит использовать частотный ресурс экономнее, распределяя трафик между сетями. Следует отметить, что при нарушении работы одной из сетей, будь то широкополосная или узкополосная, поддержка критически важных голосовых коммуникаций сохранится, что существенно повышает надежность и устойчивость сети ППР в целом. Один из вариантов развернутой конвергентной радиосети с использованием технологий MCPTT и PoC представлен на рис. 3.

Что касается абонентских станций (АС), то в конвергентных системах (и это подтверждено международным опытом развертывания и эксплуатации систем PPDR [7]) целесообразно применение мультистандартных терминалов, которые показаны в

Рисунок 2
Экосистема конвергентной радиосети



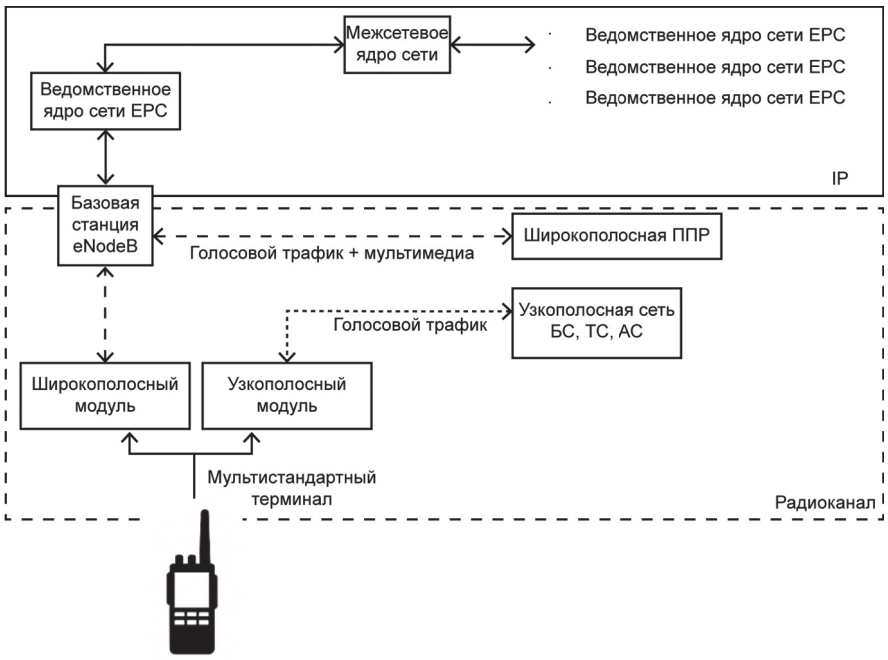
Рисунок 3
Один из вариантов развернутой конвергентной радиосети



составе оборудования на рис. 3 и 4. Для таких изделий не потребуются отдельные шлюзы сопряжения с узкополосными радиолиниями, поскольку в них использована гибридная архитектура, сочетающая в себе модули узкополосной и широкополосной связи.

Этот способ применения широкополосных технологий в работе систем ЦППР позволит избавиться от главного недостатка полного перехода на технологию LTE: несовместимости с узкополосными устройствами без системы шлюзования. Такие АС

Рисунок 4
Схема взаимодействия ведомств через единое межсетевое ядро сети EPC



будут способны поддерживать интеграцию с ядром сети посредством БС LTE, сохраняя возможность работы и в узкополосных сетях.

Себестоимость мультистандартных устройств, возможно, окажется выше, чем у устройств, разработанных только на базе технологии LTE, но в конечном счете затраты окупятся за счет наличия обратной совместимости, поскольку станет возможным поэтапное развитие радиосетей, а не полная замена всего парка устройств.

Важной особенностью рассматриваемой архитектуры конвергентных систем является возможность включения широкополосных решений в централизованное ядро сети ЦППР отдельно взятой организации или органа исполнительной власти. Дальнейшая интеграция ведомственных ядер МСРТХ в единое широкополосное ядро сети EPC (Evolved Packet Core) откроет возможность межсетевого взаимодействия между информационными системами общественной безопасности и других ведомств посредством единого узла (рис. 4, где ТС – транкинговая станция). Такой узел позволит централизованно управлять ресурсами сети с учётом приоритизации трафика и разграничения доступа пользователей, что позволит поддерживать устойчивость системы при пиковых нагрузках.

Это позволит обеспечить и эффективную работу между абонентами внутри организации, и межведомственную коммуникацию, например при возникновении чрезвычайных ситуаций. С помощью высокоуровневого ядра сети работа общей системы связи будет обеспечиваться и при использовании разных стандартов ППР внутри каждой организации благодаря применению технологий шлюзования. Однако на данный момент единая система связи в Российской Федерации, которая была бы способна обеспечить перечисленный функционал, отсутствует.

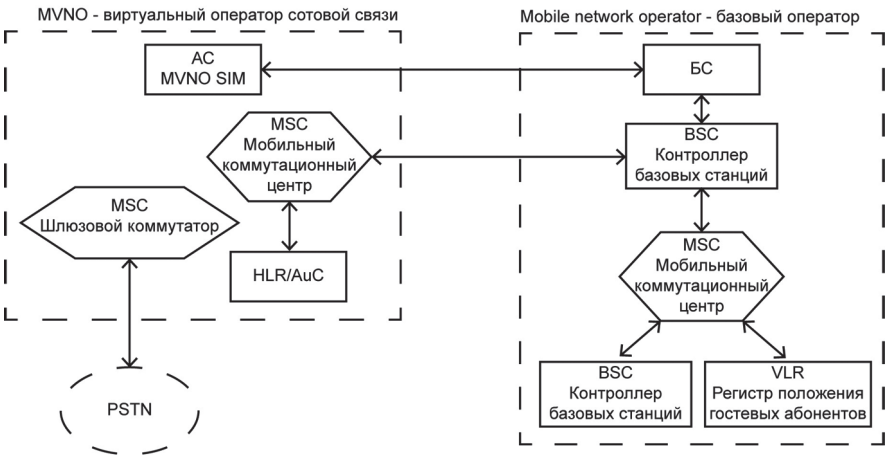
Наличие коммерческих операторов связи с собственными LTE-сетями практически в каждом субъекте Российской Федерации позволяет применять имеющуюся широко распространённую инфраструктуру, что существенно сократит расходы при построении конвергентных сетей ЦППР с использованием технологии LTE. Следует отметить и доступность оборудования – ведущими российскими предприятиями (ООО «НТЦ «Протей», ООО «Булат», ООО «КНС Групп» (Yadro), ООО «Иртея» и др. [16]) уже налажено производство абонентских и БС LTE, а также разработано отечественное программное обеспечение для них.

При повышенных требованиях к суверенности сети, например в технологических, выделенных и специальных сетях радиосвязи, к реализации может быть предложено несколько решений. Одно из них – создание на базе существующей публичной сетевой инфраструктуры изолированных сетей виртуальных операторов MVNO (Mobile Virtual Network Operator), которая позволяет использовать существующую инфраструктуру виртуальными операторами, образуя изолированные от публичных сетей сегменты связи.

Архитектура MVNO реализуется в нескольких сценариях – от обслуживания собственных SIM-карт и аутентификации пользователей до реализации собственного ядра сети, осуществляющего практически все процедуры по организации связи. Решение MVNO с полным контролем над ядром EPC носит название Full MVNO. Ключевое преимущество Full MVNO – возможность управления маршрутизацией, базой абонентов сети, приоритизацией и шифрованием. При такой реализации у оператора публичной сети (Mobile Network Operator, MNO) арендуется только сетевой ресурс.

Архитектура системы связи с использованием MVNO представлена на рис. 5: к физической части базового оператора MNO добавляется виртуальная часть – MVNO, отвечающая за логику организации связи. Физическая инфраструктура MNO включает АС, контроллер БС BSC (Base Station Controller) и центр коммутации мобильной связи MSC (Mobile Switching Center), обеспечивающий взаимодействие с телефонной сетью общего пользования PSTN (Public Switched Telephone

Рисунок 5
Схема взаимодействия MVNO и MNO



Network). Управление абонентской базой осуществляется посредством регистра домашних абонентов HLR (Home Location Register) совместно с центром аутентификации AuC (Authentication Center), а учёт роуминговых абонентов выполняется через регистр гостевых абонентов VLR (Visitor Location Register). Именно эти функции управления в модели Full MVNO переходят под контроль виртуального оператора.

Архитектура такой системы не исключает привязку к коммерческой сети базового оператора MNO, что означает сохранение зависимости от технического состояния и от возможных аварий на БС этой компании.

Кроме того, в регионах, где отсутствует стабильное покрытие LTE коммерческих операторов, возможно построение частных систем LTE ЦППР. В перспективе частные системы целесообразно объединить, сделав это как с помощью единого виртуального оператора ЦППР, так и с помощью ядра EPC широкополосной сети, что в итоге существенно повысит оперативность межсетевого взаимодействия.

В целом, наиболее перспективным направлением развития и внедрения широкополосных технологий в ЦППР представляется технология оперативной радиосвязи на базе решения MCPTT, работающая поверх имеющихся сетей LTE/5G. Внедрение MCPTT «за счет оператора связи» обладает несомненным преимуществом – использование уже имеющегося у оператора частотного ресурса. Оптимальных вариантов два: использование облачной модели (Software as a Service, SaaS) или модели MVNO (виртуальный оператор). Оператор, таким образом, берет на себя расходы по развертыванию инфраструктуры, обслуживанию серверов и обеспечению высокого приоритета трафика. Немаловажно и то, что, как представляется, операторы будут заинтересованы в реализации данной технологии, поскольку получат приток новых абонентов уровня ФОИВ и ключевых организаций с государственным участием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение конвергентных систем связи, сочетающих в себе преимущества широкополосных и узкополосных технологий, является перспективным направлением развития ППР. Такая архитектура позволяет использовать существующую инфраструктуру, в том числе задействовать имеющийся частотный ресурс операторов мобильной связи, при этом обеспечивая ФОИВ и ключевые организации-потребители услуг ППР высокоскоростными защищенными каналами для бесперебойной передачи критически важной информации.

Предложенные решения способствуют развитию отрасли связи, существенно повышая возможности и эффективность существующих систем ППР, обеспечивая тем самым скорейшее достижение технологического суверенитета Российской Федерации в области профессиональной подвижной радиосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 71586.1-2024. Цифровая профессиональная подвижная радиосвязь. Общие положения. Режим прямой конвенциональной связи абонентских станций.

2. ГОСТ Р 71586.2-2024. Цифровая профессиональная подвижная радиосвязь. Режим связи абонентских станций через ретранслятор.

3. ГОСТ Р 71586.3-2024. Цифровая профессиональная подвижная радиосвязь. Транкинговый режим связи абонентских станций.

4. Шорин, О.А. Российский рынок профессиональной радиосвязи и критически важных коммуникаций: состояние, проблемы перспективы / О.А. Шорин, Р.Ю. Каспари // Электросвязь. – 2021. – № 6. – С. 14-24.

5. Климов, Д.А. Особенности современного развития систем профессиональной мобильной радиосвязи / Д.А. Климов, М.Ю. Сподобаев // Электросвязь. – 2022. – № 9. – С. 11-14.

6. Тынянкин, С.И. Нормативно-правовое регулирование профессиональной подвижной радиосвязи в Российской Федерации / С.И. Тынянкин, В.М. Балюков, В.Н. Догадченко и др. // Электросвязь. – 2022. – № 9. – С. 15-19.

7. Всемирная конференция радиосвязи 2019 года (ВКР-19). Заключительные акты. Резолюция 646 ВКР-15. Обеспечение общественной безопасности и оказание помощи при бедствиях. – https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.14-2019-PDF-R.pdf (дата обращения: 17.04.2026).

8. 3GPP TS 36.213. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. – https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2427 (дата обращения: 30.03.2026).
9. ГОСТ Р 58166-2018. Технические требования к радиоинтерфейсу широкополосной подвижной радиосвязи (ШПР). Организация протоколов и алгоритмов работы на канальном и физическом уровнях. Основные параметры и технические требования.
10. Рекомендация МСЭ-R M.2015-1 (02/2015). Планы размещения частот для систем радиосвязи, используемых для обеспечения общественной безопасности и оказания помощи при бедствиях в полосах УВЧ в соответствии с Резолюцией 646 (Пересм. ВКР-12). – https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2015-1-201502-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 17.04.2026).
11. Попов, С.А. От PMR к ППР: X Международный форум ProfComm 2023 / С.А. Попов // Первая миля. – 2023. – № 8. – С. 12-19.
12. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24.11.2023 № 3339-р «Об утверждении Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года». – http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312040015 (дата обращения: 25.03.2026).
13. Попов, С.А. ProfComm 2024: в центре внимания частные сети LTE/5G / С.А. Попов // Первая миля. – 2024. – № 8. – С. 14-22.
14. Отключение сетей 3G в России ускорится в 2026 году. – https://riamo.ru/news/obschestvo/otkljuchenie-setej-3g-v-rossii-uskoritsja-v-2026-godu (дата обращения: 26.03.2026).
15. Перепилицын, А.Ю. Конвергентные сети связи нового поколения: архитектурные принципы и реализация глубокой интеграции ППР и LTE / А.Ю. Перепилицын // Первая миля. – 2025. – № 6. – С. 18-21.
16. Аналитическая карта «Российские производители и разработчики решений для сетей LTE и 5G». –https://www.comnews.ru/sites/default/files2019/vision-files/cnposterlte5g20250729.pdf (дата обращения: 23.04.2026).

Получено 03.04.2026;
принято к печати 09.04.2026

Prospects for the use of broadband technologies in digital professional mobile radio communication

D.A. Klimov, The M.I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication (NRCT), deputy director general for research, associate professor, Ph.D.; klimovda@nic-t.ru
E.E. Devyatkin, NRCT, director of research center, Ph.D.(Econ.); devyatkinee@nic-t.ru
A.A. Zhilchenko, NRCT, head of department; zhilchenkoaa@nic-t.ru
V.N. Timofeev, NRCT, deputy head of department; timofeevvn@nic-t.ru
E.E. Mukhin, NRCT, engineer; muhinee@nic-t.ru

Abstract. The article discusses architectural approaches to the use of the LTE standard in the digital professional mobile radio communication systems of the Russian Federation. The article provides a rationale for the choice of LTE and compares the options for integrating broadband technologies in radio networks, including the transition to exclusively broadband technologies or the creation of a converged model that allows for coexistence with existing narrowband systems. The article also highlights the advantages of multi-standard terminals. Special attention is paid to the methods of implementing broadband technologies, including the use of the MVNO model and the MCPTT service, and taking into account international experience in building public safety systems and disaster relief PPDR. The article concludes that it is advisable to implement a hybrid architecture in stages as a balanced solution for organizing communication in conditions of increased security and reliability requirements, for example, when ensuring the activities of critical information infrastructure entities in the Russian Federation.

Keywords: professional mobile radio, certification, competencies, authentication, interoperability, testbed, interagency, broadband communication, LTE.
For citation: Klimov, D.A. Prospects for the use of broadband technologies in digital professional mobile radio communication / D.A. Klimov, E.E. Devyatkin, A.A. Zhilchenko et al. // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 2-10. (in russian)

REFERENCES

1. GOST R 71586.1-2024. Digital Professional Mobile Radio. General Provisions. Direct Conventional Communication Mode of Subscriber Stations. (in russian)
2. GOST R 71586.2-2024. Digital Professional Mobile Radio. Communication Mode of Subscriber Stations via Repeater. (in russian)
3. GOST R 71586.3-2024. Digital Professional Mobile Radio. Trunking communication mode of subscriber stations. (in russian)
4. Shorin, O.A. Russian market of professional mobile radio and critical communications: current state, problems, prospects / O.A. Shorin, R.Yu. Kaspari // Electrosvyaz. – 2021. – No. 6. – P. 14-24. (in russian)
5. Klimov, D.A. Features of the modern development of professional mobile radio communication systems / D.A. Klimov, M.Yu. Spodobaev // Electrosvyaz. – 2022. – No. 9. – P. 11-14. (in russian)
6. Tynyankin, S.I. Legal regulation of professional mobile radio communications in the Russian Federation / S.I. Tynyankin, V.M. Balyukov, V.N. Dogadchenko et al. // Electrosvyaz. – 2022. – No. 9. – P. 15-19. (in russian)

7. 2019 World Radiocommunication Conference (WRC-19). Final Acts. Resolution 646 WRC-15. Ensuring public safety and providing disaster relief. – https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.14-2019-PDF-R.pdf. (in russian)
8. 3GPP TS 36.213. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. – https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2427.
9. GOST R 58166-2018. Technical requirements for the radio interface of broadband mobile radio communications Organization of protocols and algorithms operating at the data link and physical layers. Basic parameters and technical requirements. (in russian)
10. ITU-R Recommendation M.2015-1 (02/2015). Frequency arrangements for public protection and disaster relief radiocommunication systems in UHF bands in accordance with Resolution 646 (Rev.WRC-12). (in russian)
11. Popov, S.A. From PMR to PPR: X International Forum ProfComm 2023 / S.A. Popov // Last mile. – 2023. – No. 8. – P. 12-19. (in russian)
12. Order of the Government of the Russian Federation No. 3339-r dated 24.11.2023 «On Approval of the Development Strategy for the Russian Federation's Communications Industry for the Period up to 2035». – http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312040015. (in russian)
13. Popov, S.A. ProfComm 2024: Private LTE/5G Networks in Focus / S.A. Popov // Last mile. – 2024. – No. 8. – P. 14-22. (in russian)
14. Shutdown of 3G Networks in Russia to Accelerate in 2026. – https://riamo.ru/news/obschestvo/otkljuchenie-setej-3g-v-rossii-uskoritsja-v-2026-godu. (in russian)
15. Perepilitsyn, A.Yu. Convergent next-generation communication networks: architectural principles and implementation of deep PMR and LTE integration / A.Yu. Perepilitsyn // Last mile. – 2025. – No. 6. – P. 18-21. (in russian)
16. Analytical map «Russian Manufacturers and Developers of Solutions for LTE and 5G Networks». – https://www.comnews.ru/sites/default/files2019/vision-files/cnposterlte5g20250729.pdf. (in russian)

Подробнее:

XIII Международный форум
о профессиональных сетях и системах связи

ProfComm
2026

17.11.2026



ProfComm – это уникальная авторитетная площадка для конструктивного диалога по вопросам обеспечения надёжности и бесперебойной работы телекоммуникационной инфраструктуры профессиональной подвижной радиосвязи. В центре обсуждения — актуальные вызовы и задачи укрепления технологического суверенитета, успешные практики и перспективы выхода российского рынка ППР на новый уровень, текущие тренды и стратегии дальнейшего развития отрасли в современных условиях.

Организатор: COMNEWS CONFERENCES

Холидей Инн Москва Сокольники
Москва, Русаковская ул., д. 24

Зеркальные миры – сетевая метавселенная 2.0

А.С. Бородин, генеральный директор исполнительного комитета Регионального Содружества в области Связи (РСС), к.т.н., к.пол.н.; borodin@msk.ru
К.Х. Май, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), аспирант кафедры сетей связи и передачи данных; mai.kkh@sut.ru
А.Н. Волков, СПбГУТ, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, д.т.н.; artemanv.work@gmail.com
А.С.А. Мутханна, СПбГУТ, профессор кафедры сетей связи и передачи данных, д.т.н.; ammarexpress@gmail.com
А.Е. Кучерявый, СПбГУТ, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных, профессор, д.т.н.; akouch@mail.ru

УДК 621.391 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.002

Аннотация. *В данной статье представлен анализ концепции Зеркальных миров (Mirror Worlds) как следующего этапа развития метавселенных/сетевых вселенных. На основе анализа международных стандартов, текущего состояния исследований, а также развития базовых технологий и общественных потребностей в статье анализируется закономерный переход от традиционных виртуальных миров к модели Зеркальных миров, в которой цифровая среда отражает реальный мир и обеспечивает взаимодействие между физической и виртуальной средами в режиме реального времени. Также анализируются ключевые технологии сетевых вселенных и определяются основные вызовы, возникающие при построении и эксплуатации таких систем. Рассматриваются международные стандарты и направления дальнейших исследований, способствующие становлению и устойчивому развитию Зеркальных миров – сетевой метавселенной 2.0.*

Ключевые слова: *метавселенные, сетевая вселенная, Зеркальные миры, виртуальная реальность, дополненная реальность, искусственный интеллект, интернет вещей, энергопотребление.*

Для цитирования: *Бородин, А.С. Зеркальные миры – сетевая метавселенная 2.0 / А.С. Бородин, К.Х. Май, А.Н. Волков и др. // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 11-23.*

ВВЕДЕНИЕ

Принятая в октябре 2024 г. Резолюция 105 Всемирной ассамблеи по стандартизации электросвязи (ВАСЭ) о поощрении и укреплении стандартизации в области метавселенных (сетевых вселенных) обозначила официальный старт новой эпохи в области сетей и услуг [1]. Для исследования современных проблем науки в данном направлении стоит обратить внимание на историю возникновения сети интернет и причинно-следственную связь между телекоммуникационными сетями и эволюцией «цифровой» реальности. Некогда актуальная с научной точки зрения концепция интернета вещей стала предвестником изменений/перемен классических моделей человек-сеть, что, впрочем, можно было подметить в определении интернета вещей от Международного союза электросвязи (МСЭ) в фундаментальной рекомендации Y.4000/Y.2060 [2]: *интернет вещей (Internet of things (IoT)) – глобальная инфраструктура для информационного общества, которая обеспечивает возможность предоставления более сложных услуг путем соединения друг с другом (физических и виртуальных) вещей на основе существующих и развивающихся функционально совместимых информационно-коммуникационных технологий*.

Интернет вещей к 2026 г. стал действительно инфраструктурой для современного информационного общества: программы цифровой экономики, экономики данных базируются на тех возможностях, моделях и принципах, которые стали более совершенными благодаря развитию технологий IoT. Такие решения, как беспилотный транспорт, умный и безопасный город, умное производство (индустрия 4.0), умный дом и множество других практических применений IoT стали естественными инженерными системами, привычными для общества, без которых не видится современное развивающееся государство. Таким образом, развитие интернета вещей привело не только к соединению физических и виртуальных объектов (виртуальных вещей, веб-вещей), но и к формированию непрерывного потока данных о состоянии окружающего мира, деятельности человека во всех сферах жизни. Естественным образом была сформирована возможность совершенно иной формы представления, интерпретации и использования этих данных. И данным представлением стала концепция виртуальных миров, в которых данные, получаемые из физической среды, или данные, сгенерированные на основе опыта физической среды, приобретают наглядную и интерактивную форму. Термин «метавселенная» происходит из научно-фантастического романа «Лавина» (в оригинале «Snow Crash»), опубликованного писателем Н. Стивенсоном в 1992 г., в котором метавселенная описывается как виртуальная сфера, параллельно существующая

с физическим миром. С развитием современных наук и технологий эта концепция не только существует как идея, но и становится частью нашей жизни. Метавселенная или сетевая вселенная представляют собой виртуальные миры, где пользователи могут существовать, взаимодействовать друг с другом и делиться опытом. Такие виртуальные миры интегрируют различные технологии и приложения, а также управляются несколькими сущностями. При условии их системного развития многие отрасли должны получить положительный и качественный синергетический эффект, например: здравоохранение, образование, технологии игр, искусство и культура, производство, строительство, добыча и обработка ископаемых, торговля и бизнес.

Рисунок 1
Эволюция «цифровой» реальности



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭВОЛЮЦИИ СЕТЕВЫХ ВСЕЛЕННЫХ

Развитие виртуальных сред привело к их естественному расширению и усложнению. В стандарте ISO/IEC 18039:2019 дано следующее официальное определение виртуального мира: «*Виртуальный мир: виртуальная среда, представляющая собой пространственную организацию нескольких виртуальных объектов с возможностью глобального взаимодействия*» [3].

Виртуальные миры/среды стали развиваться от изолированных цифровых пространств к устойчивым и взаимосвязанным социально-ориентированным экосистемам. Стоит тут отметить, что отчасти развитие социальных сетей сформировало тот пользовательский опыт, который лег своими алгоритмами и моделями в фундамент новой реальности – связанных пространств (метавселенных/сетевых вселенных). Такие среды обеспечивают непрерывное взаимодействие пользователей, цифровых объектов (аватаров), различных сервисов с виртуальными объектами посредством развитых интерфейсов человек-сеть/компьютер. Существующие проекты в области метавселенных как виртуальных миров, подошедшие к завершению своего жизненного цикла, так и не привлекли множество пользователей. В марте 2026 г. один из таких крупных проектов официально объявил о сворачивании дальнейшего развития платформы виртуальной реальности. Это событие можно рассматривать как один из признаков постепенного перехода к следующему этапу развития цифровой реальности (рис. 1).

Развитие метавселенных как виртуальных миров показывает определенное стремление пользователей к эскапизму (уходу от физической реальности ввиду различных причин). Что в итоге приводит к деформации понятной и классической модели общества, отсюда и экономики. В то же время в век цифровой экономики и экономики данных ожидается, что все же главной фигурой экономики остается человек, который создает ценности, только уже другого порядка (благодаря возможностям современной сети, интернета вещей, искусственного интеллекта (ИИ)). Как уже выше было отмечено, виртуальные миры ограничены в части своей реальности, и при исследовании технической составляющей подобных современных технологических систем необходимо учитывать социальный, психологический и экономический аспект (работая с идеями новой технологической эры, сложно не учитывать глубокую интеграцию проблем когнитивных функций пользователя: мы же говорим про иммерсивные технологии – погружение пользователя). Соответственно, ключевой ценностью сети была и остается возможность взаимодействия/связи между людьми, а в будущем – их аватарами, роботами. Этот же эффект на практике получен и в области развития искусственного интеллекта – сеть агентов ИИ стала совершенно иным, качественным рывком развития распределенного ИИ. В теории системного анализа не зря уделяется внимание характеристике сложных систем – эмерджентности (несводимости свойств системы к сумме свойств ее элементов). Человек давно стал частью сети.

Однако существующие реализации метавселенных в значительной степени остаются автономными по отношению к физическому миру, формируя самостоятельные цифровые пространства. Хотя в определении специальной фокус-группы (focus group, FG) МСЭ уточняется, что данная интегрированная экосистема виртуальных миров будет создавать новые ценности и в том числе изменяя существующую.

Метавселенная [ITU-T FG MV-20 (2023-12)][4]: интегрированная экосистема виртуальных миров, предлагающая пользователям захватывающие впечатления и создающая новую ценность с экономических, экологических, социальных и культурных точек зрения, изменяя уже существующую. (Примечание: Метавселенная может быть виртуальной, дополненной, представлять собой или быть связанной с физическим миром).

В ноябре 2025 г. была принята Рекомендация МСЭ-Т Y.4238, посвященная требованиям к интеграции виртуального и физического миров посредством цифровых двойников в метавселенной, а также возможным сценариям применения. В данной рекомендации представлено следующее определение метавселенной (сетевой вселенной) [5]: *«Метавселенная – коллективная виртуальная среда, где сходятся физический и виртуальный миры, позволяющая пользователям взаимодействовать с общими цифровыми пространствами, объектами и сервисами. (Примечание: Метавселенная может быть виртуальной, дополненной, представляющей физический мир или связанной с ним)»*.

Данное определение уже близко к той реальности, в которой сетевая вселенная действительно станет следующей эрой сети и услуг. Дальнейшее развитие данной концепции связано с усилением связи между физической и виртуальной реальностями, что как раз отмечается в определении МСЭ-Т. Это приведёт к формированию нового класса систем – зеркальных метавселенных (сетевых вселенных), в которых цифровая среда выступает отражением реального мира, опираясь на данные, поступающие от инфраструктуры интернета вещей, а также множества цифровых активов, включая аватары пользователей. Таким образом, следующим шагом в развитии метавселенных станет формирование зеркальных миров.

Рассмотрим некоторые отличительные особенности зеркальных миров, относительно виртуальных сетевых вселенных (метавселенных). Зеркальный мир не конкурирует за время пользователя внутри метавселенной, он интегрируется во все рабочие и жизненные процессы людей (человек является частью системы). Человек не «заходит» в него, он постоянно в нем находится. Онтологическая склейка миров формирует новую реальность: не виртуальные миры для побега, а интерфейс управления реальностью, где интернет вещей является нервной системой зеркального мира. Так, зеркальные миры могут представлять собой сети цифровых двойников (множественных, декомпозированных, на основе в том числе федеративного машинного обучения, метаэвристических алгоритмов, математических теориях логики первого и второго порядков). Логика второго порядка позволяет описывать систему «сверху», задавая структуру самой реальности, в то время как первый порядок описывает поведение объектов внутри уже заданной реальности. В виртуальных мирах, объединенные цифровые двойники (новый вид моделей данных) – это не просто запись в распределенных базах данных, как это принято сейчас, а это опыт/знания/практики, что исторически человечество аккумулировало. Аватары при этом представляют собой более высокий уровень представления. Аватары рассматриваются как сеть двойников, связанных онтологически с исследуемым, наблюдаемым физическим объектом (человек или иной объект). С другой стороны, в виртуальных мирах (метавселенных) возможно создать 100 и даже 1000 различных версий Санкт-Петербурга, в то время как зеркальный мир стремится к единственности/связности – это общая «копия» пространства, что создает особенную «социальную связность» системы. Это может стать фундаментом новой экономики, может обеспечить суверенитет и идентичность цифрового общества, формируемого в зеркальном мире, а не разрозненные платформы виртуальных миров. Как уже ранее отмечалось, виртуальные миры притягивают пользователей, работая с вниманием/когнитивной функцией человека, используя методы быстрого повышения уровня дофамина в организме. В это же время, зеркальные миры нацелены на эффективность процессов физического мира: городские пространства, логистика, производство, электростанции, автономный транспорт и многое другое, входящее во все сферы жизни общества (экономики государства). Зеркальный мир – это инфраструктура, единая с архитектурой государства и его экономики, соответственно, сетевые вселенные (виртуальные миры) могут быть представлены как приложения зеркального мира.

Таким образом, зеркальные миры являются более комплексными и совершенными по сравнению с предыдущими поколениями «цифровой» реальности. Они являются метавселенной 2.0, так как не отрицают физическую реальность/мир, а наделяют его «пространственным искусственным интеллектом». Так что пользователи не уходят в виртуальные миры (метавселенные/сетевые вселенные), а формируют метавселенную 2.0 вокруг себя (создают то самое «зеркало»). Таким образом, можно рискнуть сказать, что зеркальные миры – это сетевая вселенная следующего порядка (метавселенная 2.0), это определенным образом «новая киберфизическая операционная система государства», что, впрочем, согласуется как с вариантом термина от специальной фокус-группы по метавселенным от МСЭ-Т, так и с принятым стандартом Y.4238 [5].

ТЕХНОЛОГИИ СЕТЕВЫХ ВСЕЛЕННЫХ И ЗЕРКАЛЬНЫХ МИРОВ

На данный момент многие технологии, которые непосредственно относятся к сетевой вселенной, уже достигли значительных успехов, нашли свое место в современном научно-технологическом развитии и формируют новые рынки. В моделях развития продуктов услуг крупных ИТ-компаний прослеживается формирование своих экосистем, где пользователь получает более расширенные возможности, чем при точечном использовании тех или иных устройств и/или услуг, что может быть сопоставимо с идеями частных сетевых вселенных. При этом, сетевая вселенная как общесистемная технология охватывает

Рисунок 2
Применяемые технологии в сетевых вселенных



весь спектр этих технологий (рис. 2): от инфраструктурных (коммуникации и сетевое взаимодействие, повсеместные и распределенные вычисления, безопасность и конфиденциальность, ИИ и др.) до прикладных (аватары, цифровые двойники, интерактивный опыт и другие технологии).

Коммуникации и сетевое взаимодействие. Благодаря постоянному развитию современных технологий обмен большими данными между реальным и зеркальным миром может осуществляться в режиме реального времени. К этим технологиям относятся существующие сети LTE, а также сети 5G/5GA, включая такие базовые решения, как программно-конфигурируемые сети SDN, виртуализация сетевых функций NFV, IoT, граничные, облачные и динамические туманные вычисления DD-Fog для распределения ресурсов в сетях связи.

При этом надо отметить, что сейчас ситуация с развитием сетей связи весьма непростая. Пандемия в начале третьего десятилетия 21 века показала, что от сетей связи общество хотело бы получить как можно более эффективные услуги телеприсутствия. Речь идет, конечно же, о таких услугах как передача голографических копий человека, широкомасштабное использование роботов-аватаров, появление костюмов телеприсутствия и, в последние пару лет, доступность мультивселенной.

Исходя из сказанного и памятуя о том, что ждать нельзя, если мы хотим оказывать пользователям современные услуги уже сегодня, стратегический ход может быть следующим: предоставить пользователям упомянутые выше услуги телеприсутствия инвариантно по отношению к цифре поколения сетей. Для этого необходимо обеспечить возможность предоставления услуг телеприсутствия с требуемыми параметрами качества обслуживания и качества восприятия при тех реальных характеристиках и ресурсах сетей, которые предлагаются сегодня в сетях связи не только пятого, но и четвертого поколения.

Распределённые вычисления. Распределённые вычисления, объединяющие множество технологий, таких как облачные, граничные и туманные вычисления, обеспечивают бесперебойную связь и обработку данных между физическим и зеркальным мирами. Это персонализирует опыт пользователя, позволяет накапливать и обрабатывать данные из окружающей среды, обеспечивает доступ в сеть и сетевую вселенную в любое время и в любом месте, на любом устройстве. Кроме того, эта технология позволяет пользователям свободно взаимодействовать со своими аватарами и получать доступ к сервисам сетевой вселенной через смарт-объекты и общие сети, вместо необходимости использовать специальные устройства, такие как телефон, ноутбук или терминал [6].

Безопасность и конфиденциальность. Как и все другие области науки и техники, имеющие огромный потенциал развития в современной жизни, сетевые вселенные могут столкнуться с различными угрозами и кибератаками. Безопасность и конфиденциальность – два чрезвычайно важных фактора для сетевых вселенных. Для обеспечения безопасности и защиты данных как в зеркальном, так и в физическом мире необходимо реализовать такие меры киберзащиты, как обнаружение угроз, оценка рисков, контрмеры и защита конфиденциальности.

Технология блокчейна играет важную роль в построении виртуальной экономики и устойчивой системы ценностей в сетевой вселенной. В экосистеме блокчейна технология невзаимозаменяемых и неделимых токенов (non-fungible token, NFT) используется для идентификации активов и отслеживания происхождения права собственности в цепочке. Кроме того, предполагается, что в сетевых вселенных будет также интегрирована концепция децентрализованных финансов (decentralized finance, De-Fi). Концепция De-Fi предназначена для предоставления децентрализованных финансовых услуг, упрощая транзакции и управление активами прозрачным и эффективным способом и без зависимости от традиционных посредников [6].

Искусственный интеллект. Технологии ИИ, глубоко интегрированные в сетевые вселенные, повышают интерактивность, оптимизируют системы и персонализируют опыт пользователей. Традиционные технологии и телекоммуникационные сети сталкиваются со многими сложными вызовами по обеспечению энергоэффективности, распределения ресурсов и масштабируемости, а также с угрозами безопасности и конфиденциальности. Появление множества алгоритмов ИИ и передовых технологий оптимизации, машинного обучения (machine learning, ML), глубокого обучения (deep learning, DL), обучения с подкреплением (reinforcement learning, RL) и федеративного обучения (federated learning, FL) предоставило возможность ответа на эти технологические вызовы.

Простые движения человека и сложные действия возможно анализировать и распознавать с помощью ML/DL на основе данных, передаваемых через датчики и актуаторы интернета вещей, а также устройства для взаимодействия с человеком, например костюмы телеприсутствия. Стоит отметить здесь также одну из активно развивающихся технологий – TinyML (микронейросети), позволяющую обрабатывать данные на уровне простейших чипов. Технология больших данных (big data) помогает эффективно обрабатывать большие объёмы собранных данных для аватара и взаимодействий пользователей в сетевых вселенных. На основе собранных данных прогнозируются потребности пользователей и оптимизируется их опыт.

Обработка естественного языка (natural language processing, NLP) помогает пользователям взаимодействовать с сетевыми вселенными посредством устной или письменной речи, улучшая многоязычное общение между пользователями из разных стран (мультиязычные аватары). Кроме того, NLP способствует созданию различных естественных стилей общения для виртуальных персонажей и интеллектуальных систем поддержки (аватаров-ассистентов), которые способны понимать и естественным образом общаться с людьми в сетевых вселенных.

Стоит отметить немаловажную составляющую ландшафта ИИ в сетевых вселенных – сети агентов ИИ (multi-agent systems). Под сетью агентов ИИ понимается распределенная система, состоящая из множества автономных программных ИИ-сущностей (агентов), которые взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой для достижения общих или индивидуальных целей (агентов и аватаров). Каждый агент обладает способностью воспринимать информацию, принимать решения и обучаться на основе опыта. Таким образом, объединившись в сеть, взаимодействующие интеллектуальные агенты способны автономно принимать решения, координировать действия и адаптироваться к изменениям среды и поведению пользователей. Например, благодаря распределенной архитектуре, агенты могут выполнять специализированные функции – от управления поведением аватаров и виртуальных объектов до динамической настройки окружающей среды в сетевых вселенных и возможных сценариев взаимодействия. Взаимодействуя между собой и с пользователями, они обеспечивают более реалистическое, гибкое и персонализированное развитие сетевых вселенных, а также повышают устойчивость и масштабируемость всей системы.

Аватары и цифровые двойники. Аватары и цифровые двойники (digital twin, DT), ключевые технологии для зеркальных миров, уже ранее отчасти были упомянуты. Они действуют как мост между физическим и зеркальным мирами. DT создают подробные, изменяющиеся в реальном времени цифровые копии реальных объектов, систем и сред. Это помогает управлять, контролировать и оптимизировать операции посредством аналитики данных, поддержки проектирования, тестирования, предиктивного обслуживания и оптимизации жизненного цикла активов. На основе собранных фактических данных строятся математические и экспериментальные модели для построения математических симуляций с целью прогнозирования и анализа поведения системы, тем самым повышая точность и эффективность моделирования и оптимизации. С помощью 3D-симуляций DT создает визуальные, подробные и реалистичные объекты и изображения для моделирования объектов или сред, тем самым поддерживая тестирование,

проектирование и оценку характеристик объекта в виртуальном пространстве.

В сочетании с другими технологическими платформами DT способствует превращению сетевых вселенных в интеллектуальное пространство, реалистично воссоздает реальный мир, тем самым обеспечивая наиболее эффективный опыт взаимодействия между физической реальностью и виртуальным миром.

При этом аватары – это цифровые представления, обладающие высокой степенью персонализации пользователя в сетевой вселенной. Они создаются на основе интеграции биометрических данных и данных о поведении пользователя в реальном времени, включая голос, жесты и мимику лица, что в итоге формирует интернет-навыки. Таким образом, аватары обеспечивают персонализацию и цифровую идентификацию пользователя. Это действительно важно для взаимодействия пользователей в полнофункциональных сетевых вселенных. В то время как DT представляют собой технические копии, позволяющие повысить эффективность мониторинга и оптимизации процессов, аватары служат средством, позволяющим пользователю присутствовать и взаимодействовать со средой, с системными агентами и с другими пользователями через их аватары в сетевых вселенных.

Интерактивный опыт. Технологии интерактивного (иммерсивного) опыта обеспечивают реалистичное взаимодействие между пользователями и зеркальным миром. В ближайшее время ожидаются к широкому внедрению технологии голографического типа коммуникаций (holographic type communications, HTC), смешанной реальности (mixed reality, MR), а также технологии телеприсутствия на основе новых терминалов – костюмов телеприсутствия (telepresence suit). Эти технологии обеспечивают пользователям совсем иной опыт взаимодействия в реальном времени с аватарами или средой сетевой вселенной посредством голографических дисплеев, взаимодействия человека с компьютером и 3D-моделирования.

Технологии HTC и костюмов телеприсутствия предоставляют пользователям новый способ взаимодействия с сообществом. Как уже было отмечено профессором Ричардом Ли (председателем фокус-группы МСЭ по сетям 2030), после 2030 года общество будет голографическим. Вместо того чтобы присутствовать лично, пользователи могут взаимодействовать удалённо через свои аватары, например, участвовать в дистанционных совещаниях через терминалы голографического типа коммуникаций. При этом аватары могут представлять пользователя параллельно в других процессах, где уровень доступа аватара позволяет принимать решения, опираясь на имеющиеся цифровые навыки. Данный комплекс цифровых навыков формируется благодаря в том числе технологии записи жизни (lifelogging), которая является одной из ключевых в сетевых вселенных. Стоит отметить, что идея так называемых цифровых навыков возникла еще раньше, она встречается в научных публикациях об исследованиях в области интернета навыков [7, 8].

Сочетание этих технологий создает гибкую и устойчивую основу для сетевых вселенных, обеспечивая широкие возможности подключения и иммерсивный пользовательский опыт в зеркальных мирах.

Исследования сетевой вселенной показали, что необходимо перейти от интерпретации сетевой вселенной как единой цифровой среды для всех к частным сетевым вселенным. Совокупность частных сетевых вселенных создает обширное пространство, называемое мультивселенной [9]. Такой подход позволяет каждой отдельной организации создавать свою собственную сетевую вселенную, принимая во внимание соответствующие требования и ограничения и обеспечивая функциональность, определяемую разработчиком. Это приводит к разнообразному существованию в сетевой вселенной, но создает различные проблемы для научно-исследовательского сообщества и разработчиков, включая безопасность, конфиденциальность, совместимость и переносимость объектов, стандартизацию интерфейсов и форматов данных, обеспечение качества услуг, предоставляемых в киберпространствах, и др. Многие из них были частично охвачены в ходе рассмотрения фокус-группы МСЭ по сетевым вселенным (метавселенным) и их документации. Концептуально сетевая вселенная и мультивселенная представлены на рис. 3.

В новую эпоху наука и техника достигли значительных успехов, однако в настоящее время все еще существуют определенные технологические ограничения, препятствующие созданию надёжной основы для исследования и развития зеркальных миров с возможностями, развитие которых было определено ранее. В связи с этим потенциал и влияние сетевых вселенных на жизнь человека не было должным образом оценено. Такая ситуация, вероятно, будет наблюдаться в течение еще трёх-пяти лет до тех пор, пока современные технологии постепенно не усовершенствуются и не появятся новые технологии, создающие условия для разработки и экспериментальной апробации первых версий зеркальных миров. Исследователи пытаются предсказать возможные сценарии развития и применения определенных технологий в области сетевой вселенной. Эти сценарии не позволяют делать всесторонние прогнозы развития этой технологии, но служат инструментом для изучения возможных вариантов будущего. В то же время они помогают выявлять потенциальные риски и неблагоприятные последствия различных сценариев развития, чтобы можно было заранее разработать методы их решения. Поэтому необходимо формализовать и систематизировать знания об этих технологиях, при-

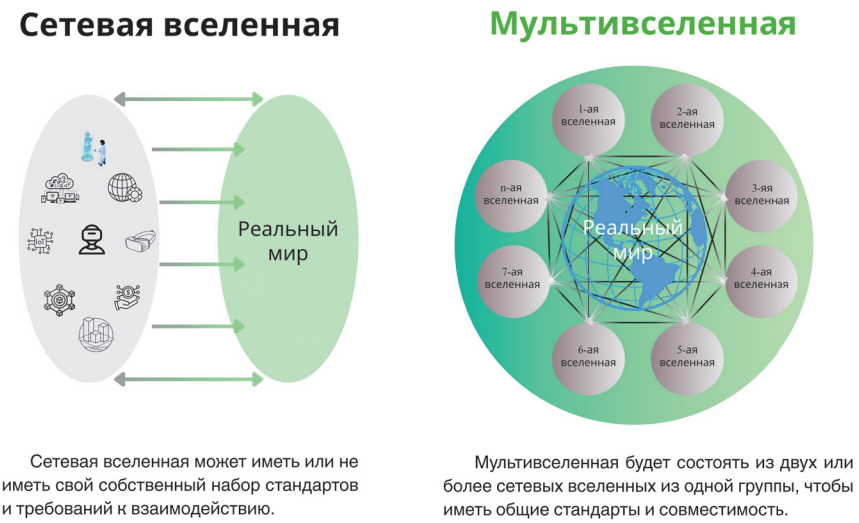
близившись к выяснению терминов и требований, формирующих понятие мультивселенной и определяющих горизонт ее развития. Создание сетевых вселенных (как следующей эры сети), особенно мультивселенных, является одной из приоритетных задач в области безопасности и суверенитета интернета как в Российской Федерации, так и в глобальном масштабе.

Стоит отметить, что в настоящий момент в 11, 20 и 21 Исследовательских комиссиях (ИК) МСЭ рассматривается 29 проектов рекомендаций, которые в основном посвящены тематике архитектур, различных структур, требований, включая вопросы совместимости аватаров, платформ сетевых вселенных и совместимости костюмов телеприсутствия.

Для определения основных сценариев метавселенных (сетевых вселенных) необходимо рассмотреть два основных вида изменений: спектра технологий (Augmentation) и приложений (Simulation, т.е. моделирование/симуляции) и их вариаций (от личного/персонального до внешнего, т.е. ориентированного на внешний мир). Зеркальные миры, аватары и голографический тип коммуникаций, а также запись жизни (логирование) являются четырьмя основными сценариями развития сетевых вселенных (рис. 4) [9].

Запись жизни, и/или логгирование – одна из растущих тенденций развития сетевых вселенных, которая подразумевает запись и хранение всех действий, взаимодействий и данных человека как в зеркальном, так и в реальном мире. Запись жизни заключается в регистрации жизненных событий, но также включает мониторинг, анализ и использование этих данных для оптимизации пользовательского опыта в виртуальных средах. Изображения, видео и аудиозаписи пользователей можно собирать с помощью различных современных инструментов, включая смартфоны, умные часы

Рисунок 3
Концептуальные модели сетевой вселенной и мультивселенной



Сетевая вселенная может иметь или не иметь свой собственный набор стандартов и требований к взаимодействию.

Мультивселенная будет состоять из двух или более сетевых вселенных из одной группы, чтобы иметь общие стандарты и совместимость.

и сенсорные устройства. Что, впрочем успешно делается на протяжении последних 15 лет, с момента активного развития инструментов на базе известных социальных сетей и множества мобильных приложений. Формы записи жизни варьируются от простой регистрации до сложного сбора и анализа данных. Её можно использовать для самосовершенствования путем отслеживания потребления калорий, физических упражнений и сна. Запись жизни является полезным инструментом для изучения того, как окружающая среда влияет на здоровье. При этом запись жизни может быть включена как одна из базовых функций цифрового аватара человека и таким образом представляет собой достаточно сложный с точки зрения обеспечения безопасности объект персональных данных. Миграция аватара в мультивселенной (между сетевыми вселенными) для обеспечения услуг будет представлять собой достаточно сложный вызов для отрасли с точки зрения технологий связи, представления и защиты персональных данных, а также проблемы совместимости между сетевыми вселенными, форматами и протоколами аватаров и др.

Голографический тип коммуникаций НТС определяется как один из наиболее перспективных сценариев развития сетевых вселенных. Он представляет собой важный шаг вперёд в технологиях передачи информации в области информационных технологий и связи. Вместо традиционной передачи данных в двухмерном формате НТС позволяет передавать полноценные трёхмерные представления, являющиеся голограммами (hologram) человека или объекта в режиме реального времени [10]. Такие голограммы обладают всеми необходимыми пространственными характеристиками, включая глубину и параллакс, а также нередко сопровождаются мультисенсорной отдачей (multisensory) [11]. Это позволяет существенно повысить уровень взаимодействия и степень восприятия удалённого пользователя при участии в реальных событиях. Благодаря НТС многие отрасли могут получить новый импульс развития, включая дистанционные медицинские консультации, телехирургию, образование, индустрию развлечений, проведение удалённых встреч и многое другое. Система НТС строится на основе трёх ключевых компонентов: источника, сети и пункта назначения. Она должна обеспечивать непрерывное выполнение полного технологического

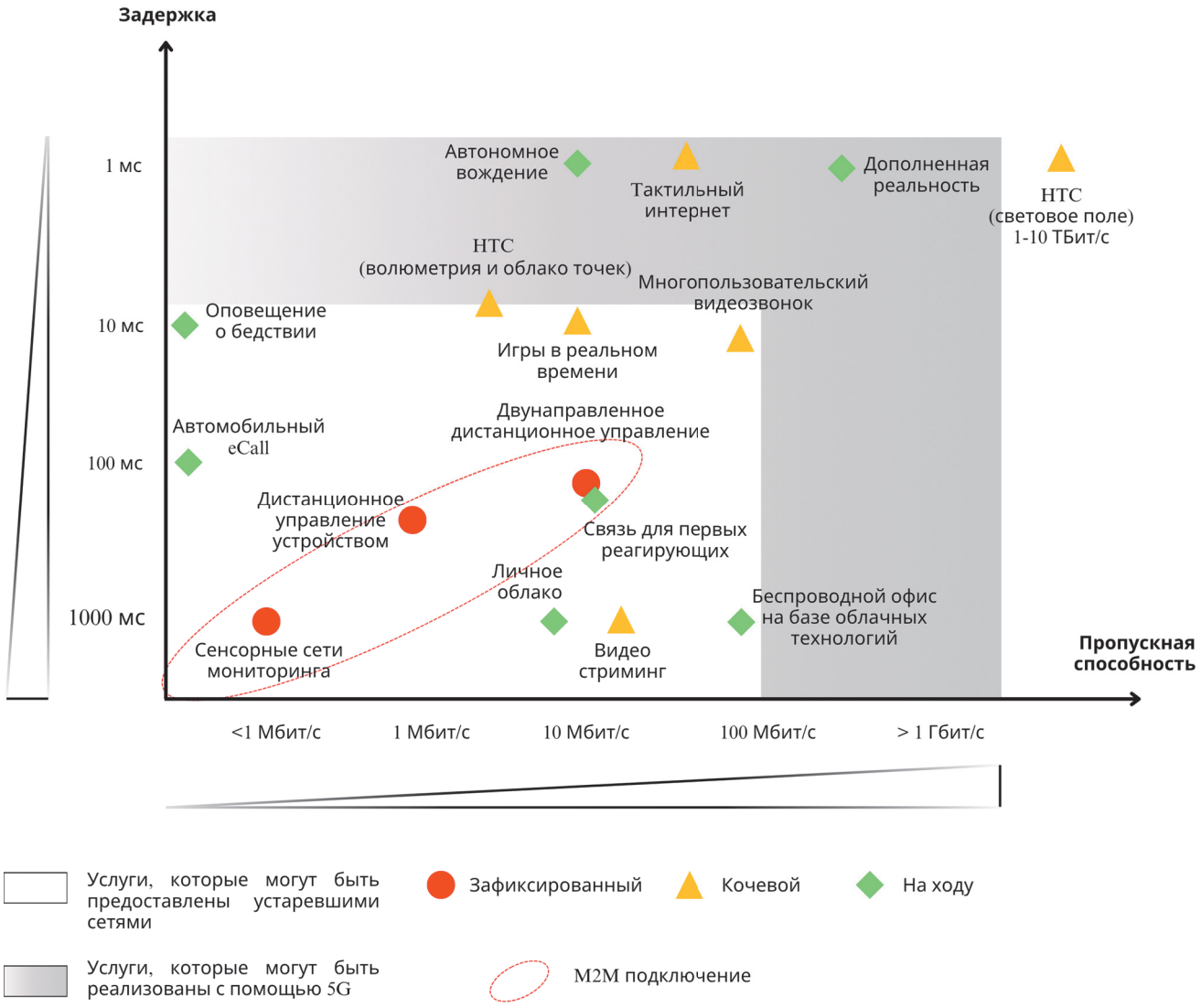
Рисунок 4
Основные сценарии сетевых вселенных



конвейера – сбор данных, кодирование, передачу и восстановление трёхмерного представления на стороне получателя. Все эти процессы должны выполняться в режиме реального времени. Это приводит к ряду серьёзных вызовов для исследователей и разработчиков технологии HTC. Среди них: необходимость обработки и постоянной синхронизации больших, детализированных и высокосложных массивов данных; жёсткие требования к качеству сети, включая сверхвысокую пропускную способность и ультранизкую задержку; повышенные требования к энергоэффективности и устойчивости в контексте перехода к зелёным ИКТ. Несмотря на перечисленные сложности, исследования и разработки в области HTC уже вышли за рамки теоретического этапа и переходят к фазе экспериментального и ограниченного предкоммерческого внедрения. На данный момент времени существует несколько подходов к формированию объемного изображения, каждый из которых обладает своими возможностями и ограничениями [10]. Например, технология волюметрических дисплеев более доступна для широкого внедрения и применения, чем технология дисплеев светового поля, как с точки зрения стоимости решения, так и с точки зрения потребности в инвариантности к поколению сети (можно начать реализацию HTC-услуг в существующем поколении сети). Например, в работах лаборатории Meganetlab 6G (СПбГУТ) был разработан ряд экспериментальных решений и модельная сеть, которые активно используются для исследования системных проблем предоставления услуг HTC. Решения HoloLink представляют собой экосистему, объединяющую различные устройства, включая XR-устройства, HoloTar, терминалы голографического телеприсутствия HoloFriend/HoloMedium, телемост и голографический цилиндр адаптивного вращения. HoloTar позволяет цифровому аватару управлять реальным роботом-гуманоидом, обеспечивая физическое взаимодействие с окружающим миром. HoloFriend/HoloMedium – персональные терминалы для отображения голограмм, обеспечивающие трансляцию 3D-моделей преподавателей, голографических лекций и поддержку иммерсивного обучения. Голографический телемост использует группу RGB-D-камер для захвата 3D-изображения пользователя, а призменная конструкция позволяет формировать парящие трёхмерные изображения в сочетании с системой пространственного аудио, что делает возможными наглядные занятия, выставки или конференции. Голографический цилиндр адаптивного вращения использует быстро вращающиеся плоскости отображения для создания динамических 3D-изображений, парящих в воздухе. Такая конструкция оптимизирована для формирования изображений большого размера, снижения стоимости и повышения удобства использования в демонстрациях, образовании и индустрии развлечений. Подводя итог, можно отметить, что HTC является одним из наиболее перспективных сценариев развития сетевых вселенных. Тем не менее, всё ещё существуют проблемы, которые необходимо решать. По мере непрерывного развития науки, особенно ключевых технологий в сфере телекоммуникаций, HTC постепенно совершенствуется и действительно становится средством, позволяющим пользователям взаимодействовать с сообществом на новом, современном уровне с принципиально иными впечатлениями.

Как уже ранее было отмечено, зеркальные миры являются цифровыми моделями, которые отражают особенности реального мира, такие как города, поведение людей, социальные явления и другие физические элементы. Эти цифровые копии являются полными симуляциями и представляют собой интерактивные копии, которые помогают пользователям лучше понять реальные события. Стоит отметить, что при этом обычные виртуальные миры являются простейшей формой и видом сетевых вселенных, на базе которых ожидается изначальное развитие ряда технологий, впрочем существующие проекты в области социальных сетей отчасти могут представлять вырожденный тип такой сетевой вселенной. Опыт зеркальных миров формирует данные для анализа влияния технологий на пользователя/экономику/общество и другие вопросы привычного физического мира. При этом данные не имеют прямого физического влияния на наблюдаемые объекты/событие, а выполняют опосредованную роль в процессах анализа и моделирования в среде зеркальных миров. На этой основе система может поддерживать принятие решений и оказывать косвенное воздействие через корректировку и оптимизацию систем физического мира. В отли-

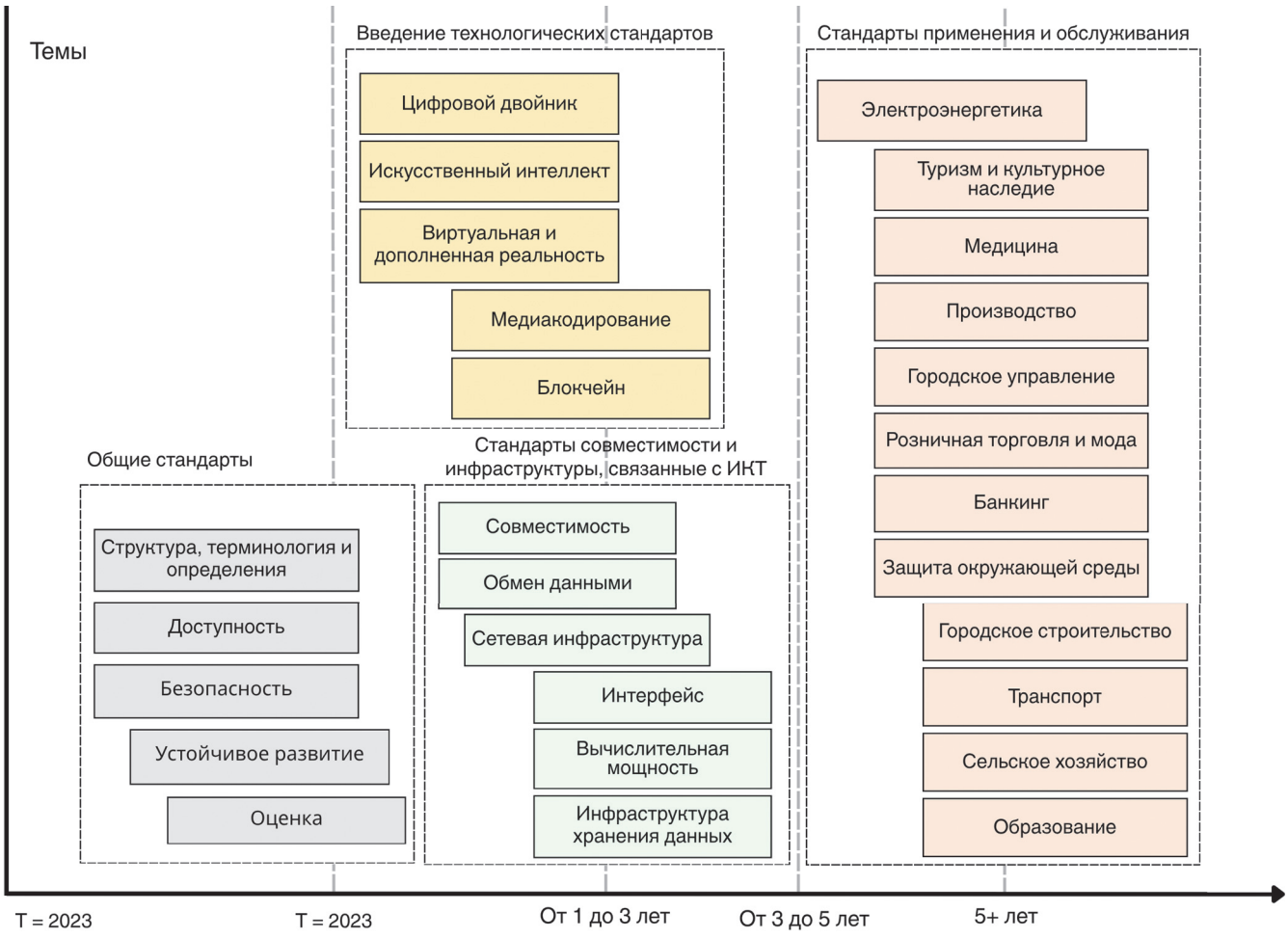
Рисунок 5
Показатели новых приложений



чие от виртуальных миров, модели зеркальных миров строятся на основе сбора больших данных из реального мира через физические системы. Мониторинг в реальном времени важнее других компонентов. Это связано с тем, что при каждом изменении физической системы цифровой двойник должен быть обновлен соответствующим образом. В будущем грань между цифровым миром и физической реальностью станет размытой, а зеркальные миры рассматриваются как основа, обеспечивающая конвергенцию этих двух сред. В обоих пространствах вопросы идентичности, доверия и репутации, социальных ролей, правил и взаимодействий остаются первостепенными.

Кроме того, следует обратить внимание на то, что одной из важных услуг современных сетевых вселенных и телекоммуникационных сетей, особенно сетей 2030, является голографический тип коммуникаций НТС. В научном отчёте фокус-группы МСЭ по технологиям для сетей 2030 [12] отмечается, что для НТС необходимо обеспечивать пропускную способность примерно от 1 Гбит/с до 1 Тбит/с, в зависимости от уровня развертывания, при задержке около 10 мс. На рис. 5 представлены требования к качеству обслуживания сети (Quality of Service, QoS) для различных технологических приложений, включая НТС. В исследовании [10] отмечается, что в локальном масштабе, например в лаборатории, некоторые ограниченные сценарии НТС могут работать на скорости 1 Гбит/с с относительно низкой задержкой. В то же время потребность в данных услугах имеется прямо сейчас. Это формирует вызов перед учеными в разработке решений для голографического типа коммуникаций, инвариантных по отношению к поколению сети. То есть доступных и в широко развитых текущих сетях

Рисунок 6
Дорожная карта стандартизации метавселенной



LTE, а также в сетях IMT-2020. Разработка решений в области голографического типа коммуникаций, доступных для всех, позволит ускорить инвестиции в инфраструктуру и тем самым приблизить реализацию сетей IMT-2020 и IMT-2030. Простыми словами, спрос на конечные услуги будет способствовать развитию и внедрению инфраструктуры, способной поддерживать зеркальные миры.

Так, в исследованиях лаборатории Meganetlab 6G (СПбГУТ), при волюметрической технологии, была реализована передача голографического объемного контента при скорости порядка 1 Гбит/с (при передаче группы видеопотоков) [13–15]. Следующим шагом совершенствования метода передачи может выступить технология передачи аватаров на базе технологии облака точек, где потребность в пропускной способности соединения точка-точка не превышает 2 Мбит/с. В данном случае аватар пользователя формируется «на лету» на основе облака точек, которые описывают положение пользователя в пространстве, а также другие визуальные детали, например мимику и т.п. В рамках регионального форума МСЭ «Технологии будущего: ИИ, метавселенная, НТС и другие ИКТ-приложения и сервисы. Видение 2030» был успешно показан прототип НТС-коммуникаций, где состоялся звонок между Таврическим дворцом, в котором проходил форум, и Московским техническим университетом связи и информатики (МТУСИ).

МЕЖДУНАРОДНАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ

На данный момент стандарты в области мультивселенной можно в целом разделить на четыре категории: общие стандарты; стандарты приложений и услуг; прикладные технологии; функциональная совместимость; и стандарты ИКТ инфраструктуры.

В фокус-группе по метавселенным МСЭ была представлена дорожная карта-видение стандартизации (рис. 6). Как выше было отмечено, сейчас в трех ИК МСЭ (11, 20, 21) в работе находятся 29 документов, которые согласуются по вопросам, отраженным в изначальной дорожной карте (см. рис. 6).

Ниже приведены названия вкладов МСЭ, которые буквально на последних собраниях групп получили статус Рекомендаций МСЭ-Т:

- Y.4238: Требования к интеграции виртуального и физического миров посредством цифровых двойников в метавселенной;
- Y.4239: Эталонная модель для интеграции виртуального и физического миров посредством цифровых двойников в метавселенной;
- Y.4240: Взаимодействие для интеграции виртуального и физического миров посредством цифровых двойников в метавселенной;
- Y.4812: Взаимодействие идентификаторов IoT-устройств на разных платформах метавселенной;
- H.770.1: Сервисные сценарии и высокоуровневые требования к межплатформенной совместимости метавселенной;
- F.748.31: Технические требования и методы оценки 3D-системы цифрового человека на основе интеллектуальных мобильных устройств;
- H.770.1: Сервисные сценарии и высокоуровневые требования к межплатформенной совместимости метавселенной.

Российская Федерация также принимает активное участие в разработке и обсуждении проектов стандартов МСЭ. Например, в ИК11 существующие проекты направлены на стандартизацию вопросов совместимости костюмов телеприсутствия, а также требования к сигнализации и функциональной архитектуре.

Над разработкой стандартов и рекомендаций для мультивселенной работают еще и следующие организации:

- Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) учредил комитет по стандартам Metaverse (CTS/MSC), Компьютерное общество SAB SC Metaverse SG (MSG) и т.д.;
- Международная организация по стандартизации (ISO) и Международная Электротехническая комиссия (IEC) образовали объединённую группу по оценке стандартизации (JSEG) метавселенной;
- Консорциум Всемирной паутины (W3C) учредил группу сообщества (открытой) совместимости метавселенной (OMI).

Ландшафт стандартизации метавселенной все ещё формируется и будет иметь важное значение для всех участников рынка. МСЭ также призывает работать вместе над разработкой открытых, прозрачных и совместимых стандартов, которые позволят сформировать устойчивую, безопасную мультивселенную.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, зеркальные миры являются наиболее перспективным сценарием сетевых вселенных, а также инструментом для решения общественных вызовов во таких областях, как транспорт и урбанизация, медицина и здравоохранение, промышленность и производство, образование и обучение, прогнозирование стихийных бедствий, управление кризисами и чрезвычайными ситуациями и многие другие области. Возможность точно воссоздавать и моделировать реальный мир в цифровом пространстве значительно сокращает время и трудозатраты, а также позволяет прогнозировать потенциальные проблемы, проактивно предлагая для них решения, тем самым оптимизируя и улучшая качество жизни. Несмотря на то, что на начальном этапе был достигнут определенный успех в решении небольших проблем реального мира с использованием цифровых двойников, ключевого компонента зеркальных миров, все еще существуют вызовы, ответы на которые позволят приблизить внедрение зеркальных миров, например: задачи роуминга аватаров, сети интернет-навыков, использование генеративного ИИ и сети агентов ИИ и многое другое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Resolution 105 – Promoting and strengthening metaverse standardization. – ITU, 2024. – 7 p. – https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/res/T-RES-T.105-2024-PDF-E.pdf.

2. Рекомендация МСЭ-T Y.2060 (06/2012). Обзор интернета вещей. –https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/en.

3. ISO/IEC 18039:2019. Information technology – Computer graphics, image processing and environmental data representation – Mixed and augmented reality (MAR) reference model. – https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/3233eea3-8a4c-4e5f-ad73-2ecb49ac731a/iso-iec-18039-2019.

4. ITU-T Focus Group Technical Specification (12/2023). ITU-T Focus Group on metaverse. Definition of metaverse. – https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-MV-2023-20-PDF-E.pdf.

5. Recommendation ITU-T Y.4238 (11/2025). Requirements for integrating virtual and physical worlds through digital twins in the metaverse. – https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4238-202511-I.

6. Rawat, D.B. Metaverse: Requirements, Architecture, Standards, Status, Challenges, and Perspectives / D.B. Rawat, H. El Alami // arXiv. – 2023. – arXiv:2302.01125. – DOI: 10.48550/arXiv.2302.01125.

7. Атея, А.А.А. Тактильный интернет как телекоммуникационные системы будущего / А.А.А. Атея, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 4. – P. 1-9. – https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2018_4/1-9.pdf.

8. Ateya, A.A. Development of Intelligent Core Network for Tactile Internet and Future Smart Systems / A.A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova et al. // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2018. – Vol. 7, Issue 1. – DOI: 10.3390/jsan7010001.

9. Горбачева, Л.С. Анализ структуры и характеристик метавселенных / Л.С. Горбачева, А.Н. Волков // Информационные технологии и телекоммуника-

ции. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 29-39. – DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-29-39. – EDN: PDZPEP.
10. Akyildiz, I.F. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade / I.F. Akyildiz, H. Guo // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. – 2022. – Vol. 3, No. 2. – P. 421-442. – DOI: 10.52953/YRLL3571.
11. Petkova, R. On the Way to Holographic-Type Communications: Perspectives and Enabling Technologies / R. Petkova, I. Bozhilov, A. Manolova et al. // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 59236-59259. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3393124.
12. FG NET-2030 Sub-G2. New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis. – ITU, 2019. – 45 p. – http://handle.itu.int/11.1002/pub/81444c78-en.
13. Ateya, A.A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks / A.A. Ateya, A.A.A. El-Latif, A. Muthanna et al. – NY: River Publishers, 2025. – 254 p. – DOI: 10.1201/9788770046749.
14. Кучерявый, А.Е. Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы: учебник / А.Е. Кучерявый, А.А.А.А. Давуд, А.Н. Волков и др. – СПб.: Питер, 2024. – 318 с.
15. Волков, А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый и др. // Электросвязь. –2023. – №6. – С. 5-14.

Получено 28.04.2026;
принято к печати 05.05.2026

Mirror worlds – network metaverse 2.0

A.S. Borodin, director general of the executive committee of the Regional Commonwealth in the Field of Communications (RCC), Ph.D.; borodin@msk.ru
C.H. Mai, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), department of communication networks and data transmission, postgraduate; mai.kkh@sut.ru
A.N. Volkov, SPbSUT, department of communication networks and data transmission, associate professor, Dr.Sci.(Tech.); artemanv.work@gmail.com
A.S.A. Muthanna, SPbSUT, department of communication networks and data transmission, professor, Dr.Sci.(Tech.); ammarexpress@gmail.com
A.E. Koucheryavy, SPbSUT, head of the department of communication networks and data transmission, professor, Dr.Sci.(Tech.); akouch@mail.ru

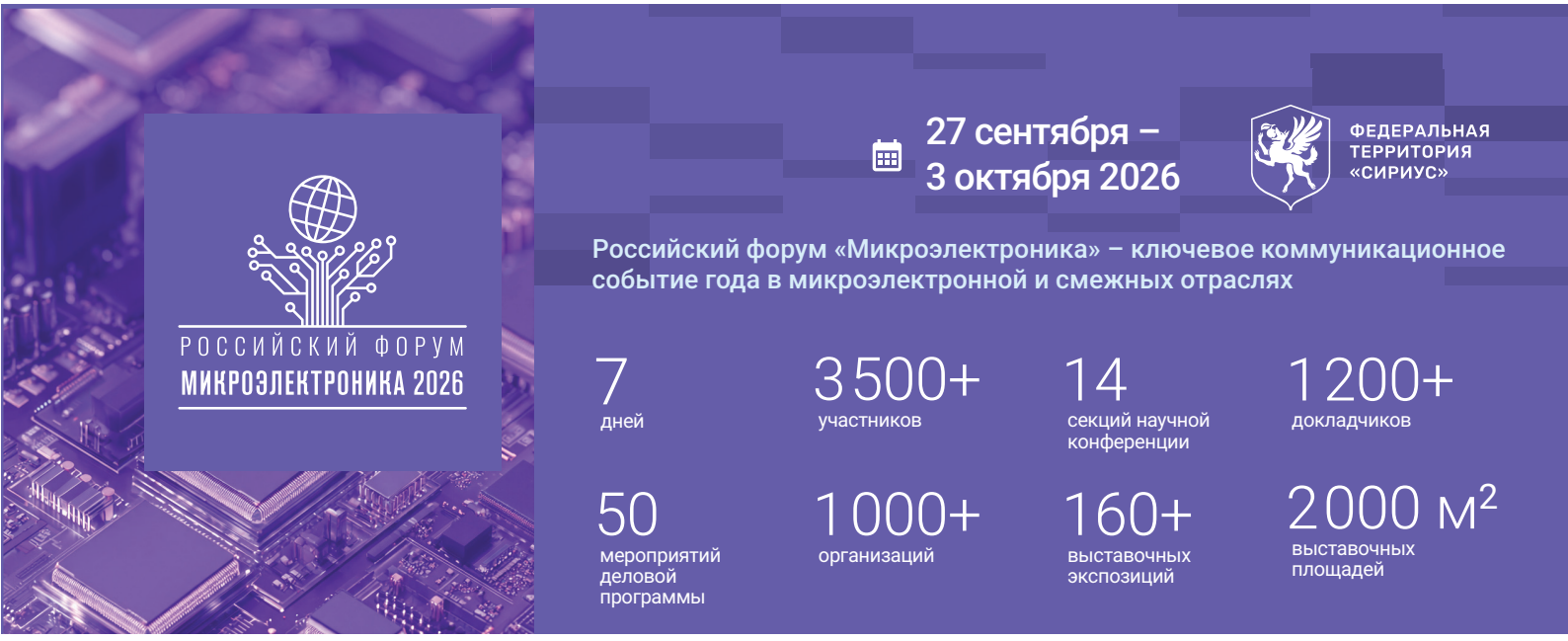
Abstract. This article presents a comprehensive review of the concept of Mirror Worlds as the next stage in the development of the metaverse/network verse. Based on an analysis of international standards, the current state of research, as well as the development of core technologies and societal needs, the article analyzes the inevitable progression from traditional virtual worlds to the Mirror Worlds model, in which the digital environment reflects the real world and enables bidirectional interaction between physical and virtual environments in real time. The article also examines the key technologies of network verses and identifies the major challenges arising in the design, deployment, and operation of such systems. Finally, the paper discusses international standards and future research directions that contribute to the building and sustainable development of Mirror Worlds – Metaverse 2.0.

Keywords: metaverses, network verse, mirror worlds, virtual reality, augmented reality, artificial intelligence, Internet of Things, energy.
For citation: Borodin, A.S. Mirror worlds – network metaverse 2.0 / A.S. Borodin, C.H. Mai, A.N. Volkov et al. // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 11-23. (in russian)

REFERENCES

1. Resolution 105 – Promoting and strengthening metaverse standardization. – ITU, 2024. – 7 p. – https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/res/T-RES-T.105-2024-PDF-E.pdf.
2. Recommendation ITU-T Y.2060 (06/2012). Overview of the Internet of Things. – https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/en.
3. ISO/IEC 18039:2019. Information technology – Computer graphics, image processing and environmental data representation – Mixed and augmented reality (MAR) reference model. – https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/3233eea3-8a4c-4e5f-ad73-2ecb49ac731a/iso-iec-18039-2019.
4. ITU-T Focus Group Technical Specification (12/2023). ITU-T Focus Group on metaverse. Definition of metaverse. – https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-MV-2023-20-PDF-E.pdf.
5. Recommendation ITU-T Y.4238 (11/2025). Requirements for integrating virtual and physical worlds through digital twins in the metaverse. – https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4238-202511-I.
6. Rawat, D.B. Metaverse: Requirements, Architecture, Standards, Status, Challenges, and Perspectives / D.B. Rawat, H. El Alami // arXiv. – 2023. – arXiv:2302.01125. – DOI: 10.48550/arXiv.2302.01125.
7. Ateya, A.A. Tactile Internet: Future Telecommunication Systems / A.A. Ateya, A. Muthanna, A. Koucheryavy // Telecom IT. – 2018. – Vol. 6, Issue 4. – P. 1–9. – https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2018_4/1-

9.pdf. (in russian)
8. Ateya, A.A. Development of Intelligent Core Network for Tactile Internet and Future Smart Systems / A.A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova et al. // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2018. – Vol. 7, Issue 1. – DOI: 10.3390/jsan7010001.
9. Gorbacheva, L.S. Analysis of Metaverses Structure and Characteristics / L.S. Gorbacheva, A.N. Volkov // Telecom IT. – 2024. – Vol. 12, No. 1. – P. 29-39. – DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-29-39. – EDN: PDZPEP. (in russian)
10. Akyildiz, I.F. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade / I.F. Akyildiz, H. Guo // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. – 2022. – Vol. 3, No. 2. – P. 421-442. – DOI: 10.52953/YRLL3571.
11. Petkova, R. On the Way to Holographic-Type Communications: Perspectives and Enabling Technologies / R. Petkova, I. Bozhilov, A. Manolova et al. // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 59236-59259. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3393124.
12. FG NET-2030 Sub-G2. New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis. – ITU, 2019. – 45 p. – http://handle.itu.int/11.1002/pub/81444c78-en.
13. Ateya, A.A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks / A.A. Ateya, A.A.A. El-Latif, A. Muthanna et al. – NY: River Publishers, 2025. – 254 p. – DOI: 10.1201/9788770046749.
14. Koucheryavy, A. Sixth-generation communication networks: fractal architectures, holographic interactions, telepresence, network robots: textbook / A.E. Kucheryavy, A.A.A. Davud, A.N. Volkov et al. – Saint Petersburg: Piter, 2024. – 318 p.
15. Volkov, A.N. Perspective research of networks and services 2030 in the laboratory 6G Meganetlab SPbSUT / A.N. Volkov, A.S.A. Muthanna, A.E. Kucheryavy et al. // Electrosvyaz. – 2023. – No. 6. – P. 5-14.



+7 495 641 57 17
office@proconf.ru | microelectronica.pro

Организаторы НИИМЭ, ПРОГРЕСС. При поддержке Минпромторг России, МИНОБРНАУКИ РОССИИ. Генеральный партнёр ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. Инновационный партнёр МИЭТ. Образовательный партнёр Сириус. Партнёры TI, ИТ-холдинг, SOVTEST, Концерн ВКО Алмаз – Антей, ostec, НИИТМ. Партнёр детской программы НКК. Генеральный информационный партнёр ТЕХНОСФЕРА. Оператор Форума ПрофКонференции

ЭКОНОМИКА ДАННЫХ: СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Экспериментальная оценка алгоритма выбора узлов хранения при выполнении операции записи с репликацией данных в распределенной телекоммуникационной инфраструктуре

В.С. Елагин, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), доцент кафедры ИКС, к.т.н.; v.elagin@sut.ru
Н.М. Редругина, СПбГУТ, доцент кафедры ИКС, к.т.н.; redrugina.nm@sut.ru
А.А. Савельева, СПбГУТ, старший преподаватель кафедры ИКС; saa@sut.ru

УДК 621.39:004.75 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.003

Аннотация. *Рассматривается операция записи с репликацией данных в распределенной подсистеме хранения инфраструктуры туманных вычислений телекоммуникационной системы. Цель исследования состоит в оценке влияния стратегии выбора узлов хранения на время завершения записи при различных режимах подтверждения, неоднородности сетевых задержек и росте входной нагрузки. Операция записи представлена Fork-Join-моделью, учитывающей параллельную передачу данных, локальную запись и получение подтверждений. Сопоставлены строгий и пороговый режимы подтверждения, равномерное распределение и адаптивный выбор узлов с учетом пользовательских и служебных очередей. Показано, что повышенная задержка в одной из ветвей обслуживания приводит к более раннему росту времени завершения операции. Установлено, что адаптивный выбор узлов снижает влияние неоднородности сетевых условий и смещает область перегрузки к более высоким значениям входной нагрузки. Результаты могут использоваться при настройке подсистем хранения данных.*

Ключевые слова: *туманные вычисления, телекоммуникационная система, распределенная подсистема хранения, репликация, операция записи, Fork-Join, сетевая задержка, управление информационными потоками.*

Для цитирования: *Елагин, В.С. Экспериментальная оценка алгоритма выбора узлов хранения при выполнении операции записи с репликацией данных в распределенной телекоммуникационной инфраструктуре / В.С. Елагин, Н.М. Редругина, А.А. Савельева // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 24-35.*

ВВЕДЕНИЕ

Развитие телекоммуникационных систем пятого и последующих поколений сопровождается ростом требований к задержке, устойчивости обслуживания, распределенности обработки данных и эффективному использованию сетевых ресурсов. В исследованиях задержек в сетях пятого поколения на примере цепочек виртуальных сетевых функций отмечается [1], что будущие сети связи будут предоставлять настраиваемые виды услуг, чувствительные к задержкам и требуемому качеству обслуживания. Для настоящей работы принципиально значим подход, при котором задержка определяется не только временем передачи, но и совокупностью задержек ожидания в очереди, обработки и передачи пакетов при прохождении трафика через элементы сетевой инфраструктуры.

В рекомендациях, определяющих направления развития стандарта IMT-2030, подчеркивается расширение сценариев применения сетей связи и необходимость формирования новых возможностей по сравнению с IMT-2020 [2]. В этих условиях возрастает значение архитектур пограничных и туманных вычислений, обеспечивающих размещение вычислительных и сервисных функций ближе к источникам данных и пользователям телекоммуникационных сервисов [3–5].

В отечественных исследованиях по сетям IMT-2030 [6] отмечается, что одним из актуальных направлений развития сетей 2030 является декомпозиция вычислительной и сетевой среды для поддержки будущих технологически сложных услуг. Кроме того, подчеркивается общий вектор развития, связанный с декомпозицией и распределением систем обработки данных. В этих условиях целесообразно рассматривать подсистемы уровня туманных вычислений не только как вычислительные компоненты, но и как элементы распределенной сетевой инфраструктуры, влияющие на обслуживание пользовательских запросов.

В составе такой инфраструктуры подсистема хранения данных не может рассматриваться только как изолированный вычислительный компонент. Узлы хранения, размещенные на туманном или пограничном уровне, участвуют в процессах передачи, обработки и хранения информации, а также формируют дополнительную нагрузку на коммуникационные ресурсы сети, что особенно существенно при использовании репликации, поскольку каждая операция записи сопровождается передачей данных на несколько узлов, возвратом подтверждений и формированием служебного межузлового трафика.

В распределенных подсистемах хранения параметры репликации и подтверждения позволяют регулировать соотношение между согласованностью, доступностью и временем выполнения операций [7]. Однако в туманной телекоммуникационной инфраструктуре время завершения записи определяется не только характеристиками узлов хранения, но и состоянием сетевых соединений, величиной задержки передачи, накоплением очередей обслуживания и неоднородностью коммуникационных направлений.

Равномерные стратегии распределения запросов, включая равномерное циклическое распределение (Round-Robin), просты в реализации, но не учитывают текущую загрузку узлов и состояние сетевых соединений. При увеличении времени обслуживания в одной из ветвей операции записи такая стратегия продолжает направлять часть запросов на соответствующий узел без учета повышенной сетевой задержки или накопления очереди, что приводит к росту среднего времени обслуживания и задержек верхних процентилей. Для распределенных сервисов анализ задержек верхних процентилей имеет существенное значение, поскольку позволяет оценить поведение системы в случаях обслуживания с наибольшим временем ожидания пользовательских запросов [8].

Для формального описания операции записи с последующей репликацией данных целесообразно использовать модель Fork-Join, в которой входящая заявка разделяется на несколько параллельных подзадач, выполняемых на разных узлах, а завершение исходной операции происходит после синхронизации результатов [9, 10]. В настоящей работе Fork-Join-представление используется для описания цепочки обслуживания операции записи, включающей передачу данных, локальную запись и возврат подтверждений.

Целью статьи является экспериментальная оценка алгоритма выбора узлов хранения при выполнении операции записи с репликацией в распределенной подсистеме хранения туманного уровня. В качестве базовой стратегии используется равномерное циклическое распределение запросов, а в качестве исследуемой – выбор узлов с учетом состояния пользовательских и служебных очередей. В отличие от оценки готовности к обслуживанию операции записи, в настоящей статье акцент сделан на временной характеристике обслуживания и на влиянии стратегии выбора ветвей обслуживания операции записи при неоднородных сетевых условиях.

В статье рассматривается задача оценки влияния стратегии выбора узлов хранения на временные характеристики операции записи с репликацией данных в условиях неоднородных сетевых задержек. Основное внимание уделяется сравнению равномерного распределения запросов и адаптивного выбора узлов с учетом состояния пользовательских и служебных очередей.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА УЗЛОВ ХРАНЕНИЯ НА ВРЕМЯ ЗАПИСИ

Распределенная подсистема хранения данных туманного уровня рассматривается как функциональный элемент телекоммуникационной системы, обеспечивающий размещение данных, поступающих от пользовательских устройств, сервисов мониторинга и иных источников сетевого трафика. В отличие от централизованных решений, такая подсистема включает несколько узлов хранения, размещенных в разных сегментах туманной инфраструктуры и взаимодействующих через коммуникационную сеть.

Операция записи включает передачу данных от координатора к нескольким узлам хранения, выполнение локальной записи и возврат подтверждений (рис. 1). Вопросы моделирования записи в распределенной системе хранения данных с учетом репликации и влияния синхронного и асинхронного подходов на качество обслуживания (Quality of Service, QoS) и качество восприятия пользователем услуг связи (Quality of Experience, QoE) рассматривались ранее в рамках модели сети массового обслуживания [11]. В настоящей работе акцент переносится на выбор узлов хранения и влияние неоднородности ветвей обслуживания на время завершения операции записи.

При использовании репликации одна операция формирует несколько параллельных обращений к узлам, что приводит к появлению дополнительного служебного трафика. Следовательно, выбор узлов хранения влияет не только на время обслуживания пользовательского запроса, но и на распределение информационных потоков между элементами туманного уровня (Fog).

На рис. 1 облачные контуры внутри туманного уровня условно обозначают отдельные территориально или логически распределенные сегменты туманной инфраструктуры, т.е. узлы хранения могут размещаться на разных площадках или в разных зонах обслуживания, что приводит к различиям в сетевой задержке и загрузке ветвей обслуживания операции записи.

В исследовании рассматривается запись с уровнем избыточности R, определяющим количество фор-

мируемых реплик. Для завершения операции необходимо получить не менее W подтверждений от выбранных реплик, где W задает порог подтверждения записи. В зависимости от соотношения R и W анализируются два режима: строгий режим подтверждения $W=R$ и пороговый, или кворумный, режим $W<R$. В первом случае операция завершается после получения подтверждений от всех реплик, во втором – после получения заданного числа подтверждений.

Объектом исследования является операция записи с последующей репликацией данных в распределенной подсистеме хранения туманного уровня телекоммуникационной системы. Предметом исследования является влияние режима подтверждения, стратегии выбора узлов хранения, состояния очередей и сетевой задержки на время завершения операции записи.

Рисунок 1
Обобщенная схема рассматриваемой инфраструктуры

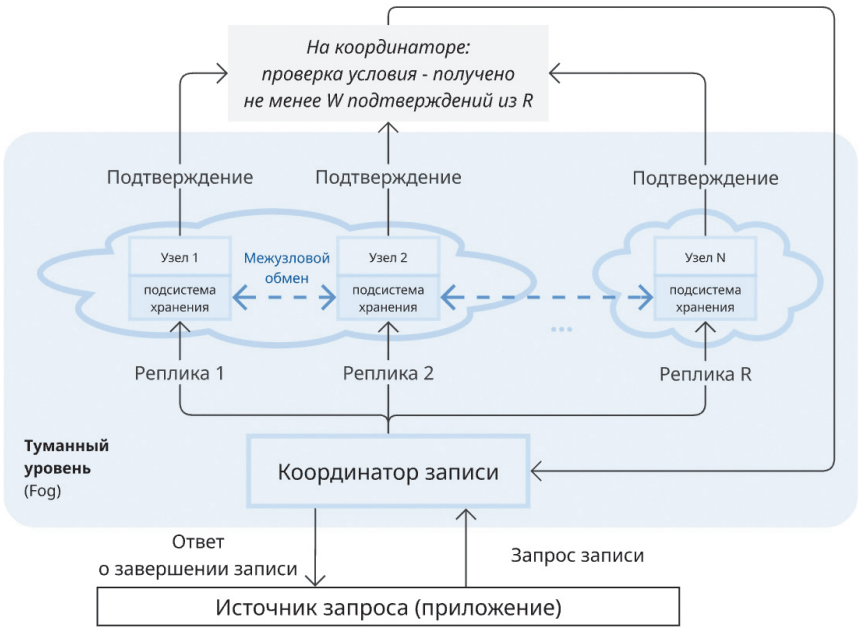


Таблица 1
Основные используемые обозначения

Обозначения	Комментарий
R	уровень избыточности, определяющий количество формируемых реплик (резервных копий данных)
W	порог подтверждения записи
N	количество доступных узлов хранения туманного уровня
T_{write}	время завершения операции записи
Ветвь обслуживания операции записи	обслуживание одной реплики данных на выбранном узле хранения, включая передачу данных, локальную запись и возврат подтверждения
Цепочка обслуживания операции записи	совокупность элементов инфраструктуры, участвующих в выполнении операции записи в целом, включая координатор, сетевые соединения и выбранные узлы хранения
$Q_i(t)$, $B_i(t)$	пользовательская и служебная очереди, учитываемые при выборе узлов хранения

В качестве базовой стратегии рассматривается равномерное циклическое распределение запросов (Round-Robin). В качестве исследуемой стратегии используется алгоритм выбора узлов хранения, учитывающий состояние пользовательских очередей $Q_i(t)$ и служебных очередей $B_i(t)$. Пользовательские очереди отражают накопление входящих запросов на запись, а служебные очереди характеризуют нагрузку, связанную с репликацией, синхронизацией и восстановлением данных. Учет служебной очереди $B_i(t)$ принципиален именно для записи с репликацией, поскольку нагрузка на узел определяется не только пользовательскими запросами, но и операциями передачи реплик, синхронизации и восстановления. Поэтому выбор узла только по пользовательской очереди $Q_i(t)$ может приводить к недооценке фактической загрузки ветви обслуживания.

Экспериментальная проверка направлена на сопоставление следующих условий: запись при $W=R$, запись при $W<R$, выбор реплик из множества доступных узлов $N>R$, наличие неоднородной сетевой задержки и снижение пропускной способности одного из коммуникационных направлений. В качестве основного показателя используется время завершения операции записи T_{write}. Дополнительно анализируются среднее время записи, 90-й и 99-й процентили, а также относительное изменение времени записи при переходе от равномерного распределения к выбору узлов на основе текущего состояния очередей.

Основное предположение исследования состоит в том, что учет состояния пользовательских и служебных очередей при выборе узлов хранения снижает чувствительность операции записи к

ухудшению условий передачи данных в отдельном сетевом направлении по сравнению с равномерным распределением запросов (табл. 1).

МОДЕЛЬ ОПЕРАЦИИ ЗАПИСИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОДСИСТЕМЕ ХРАНЕНИЯ

После поступления пользовательского запроса координатор выбирает подмножество из R узлов хранения из множества N доступных узлов, передает им сообщения записи и ожидает подтверждения выполнения операции, поэтому запись с последующей репликацией имеет параллельный характер, т.е. передача данных, локальная запись и возврат подтверждений по нескольким ветвям обслуживания происходят одновременно, а момент завершения исходного запроса определяется выбранным режимом подтверждения. Такой способ организации записи соответствует модели Fork-Join (рис. 2 и 3) и в данной модели входящая заявка разделяется на параллельные ветви обслуживания, а выполнение исходной операции считается завершенным после получения требуемого числа результатов [12]. В терминологии настоящей статьи ветвь обслуживания операции записи соответствует фрагменту цепочки обслуживания, включающему передачу данных к отдельному узлу хранения, локальную запись и возврат подтверждения координатору.

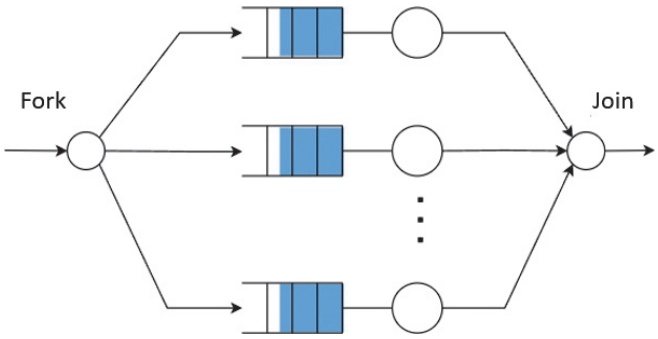
Для учета влияния сетевой инфраструктуры время выполнения подзадачи записи на i-ом узле представляется как сумма сетевой и локальной составляющих:

$$T_i = t_i^{net} + t_i^{storage},$$

где t_i^{net} – задержка передачи данных к узлу хранения и возврата подтверждения; $t_i^{storage}$ – время локального обслуживания операции записи на узле, включающее прием данных, запись и формирование подтверждения.

В расчетных сценариях, направленных на выделение влияния сетевой составляющей, локальная составляющая обслуживания фиксируется:

Рисунок 2
Представление операции записи с последующей репликацией в виде Fork-Join-модели



$$t_i^{storage} = \text{const}.$$

Локальное обслуживание узла аппроксимируется системой массового обслуживания $M/M/1$. Для устойчивого режима при $\lambda_i < \mu_i$ среднее время пребывания заявки в отдельной ветви может быть оценено выражением [13]

$$T_i^{node} = \frac{1}{\mu_i - \lambda_i},$$

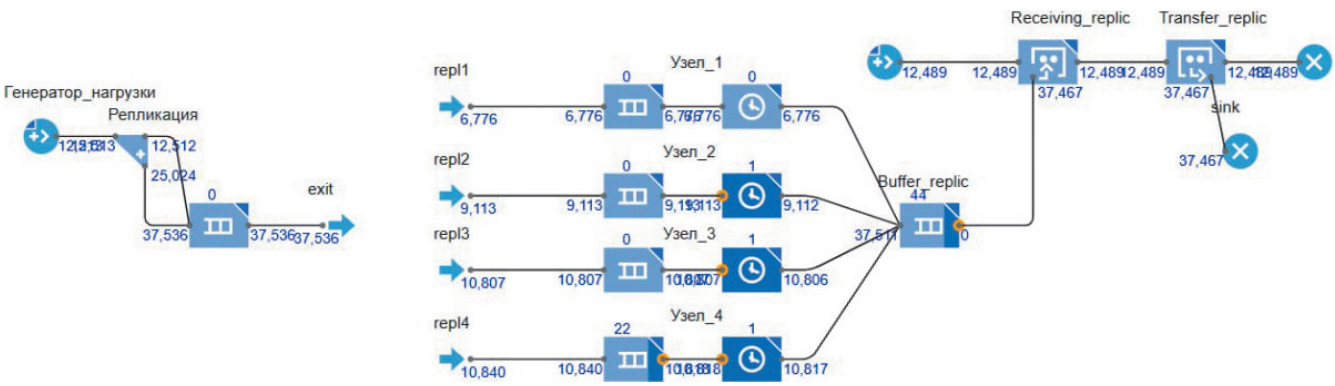
где λ_i – интенсивность поступления запросов на i-й узел; μ_i – интенсивность обслуживания i-го узла.

Данное выражение используется как расчетная аппроксимация для сопоставления сценариев, а не как исчерпывающее описание всех процессов распределенной подсистемы хранения.

В строгом режиме подтверждения $W=R$ операция завершается только после получения подтверждений от всех выбранных реплик. В этом случае время записи определяется наиболее медленной ветвью обслуживания операции записи:

$$T_{FJ} = \max(T_1, ..., T_R), \quad (1)$$

Рисунок 3
Fork-Join-модель в программе AnyLogic



где $T_1, ..., T_R$ – времена завершения обслуживания по выбранным ветвям операции записи, соответствующим R репликам данных.

Если времена завершения обслуживания по отдельным ветвям операции записи рассматриваются как независимые случайные величины с функциями распределения $F_i(t)$, то для строгого режима подтверждения функция распределения времени записи имеет вид [9, 14]

$$F_{FJ}(t) = P\left(\max_{i=1,\ldots,R} X_i \le t\right) = \prod_{i=1}^{R} P\left(T_i \le t\right) = \prod_{i=1}^{R} F_i(t), \quad (2)$$

где X_i – случайная величина, характеризующая время завершения обслуживания по i-ой ветви операции записи; $P(\cdot)$ – вероятность соответствующего события.

Из выражений (1) и (2) следует, что увеличение задержки или накопление очереди хотя бы на одном из выбранных узлов может определять время завершения всей операции записи.

Для сравнения с параллельной организацией записи в расчетной части рассматривается также последовательный вариант, при котором обращения к выбранным узлам осуществляются одно за другим:

$$T_{seq} = R\frac{1}{\mu - \lambda},$$

где R – уровень избыточности; μ – интенсивность обслуживания узла; λ – интенсивность входного потока.

Данное выражение используется как базовая линия сравнения и показывает завышенную оценку времени записи при игнорировании параллельного характера репликации.

Для оценки параллельной записи на R ветвях обслуживания используется аппроксимация среднего времени отклика Fork-Join-системы, учитывающая гармоническое число и загрузку ветвей обслуживания [10]:

$$S_{sub} = \left[H_R + \left(C_R - H_R\right)\rho_{sub}\right]\frac{1}{\mu - \lambda_{sub}},$$

где $H_R = \sum_{i=1}^{R}\frac{1}{i}$ – гармоническое число порядка R; C_R – аппроксимационный коэффициент для R параллельных ветвей; ρ_{sub} – загрузка ветви обслуживания; λ_{sub} – интенсивность поступления подзадач в ветвь обслуживания.

При этом коэффициент C_R определяется как частный случай коэффициента C_x при $x=R$. Общий вид коэффициента для произвольного числа параллельных ветвей x имеет вид:

$$C_x = \sum_{r=1}^{x}\binom{x}{r}(-1)^{r-1}\sum_{m=1}^{r}\binom{r}{m}\frac{(m-1)!}{r^{m+1}},\ x = 2,3,\ldots, \quad (3)$$

где x – число параллельных ветвей обслуживания; r и m – индексы суммирования, используемые при вычислении аппроксимационного коэффициента.

Формула (3) используется в качестве расчетной поправки интерполяционной аппроксимации, которая в статье сохраняется как часть расчетного аппарата, применяемого для сопоставления сценариев, а не как самостоятельный результат.

При пороговом режиме $W<R$ операция завершается после получения W-го подтверждения из R возможных. Если времена обслуживания по параллельным ветвям упорядочить по возрастанию, то время записи соответствует W-ой порядковой статистике, т.е. времени поступления W-го подтверждения:

$$T_{write} = T_{(W:R)}, \quad W<R;$$
$$T_{(W:R)} < \max(T_1, ..., T_R).$$

Такое представление позволяет сопоставить строгий и пороговый режимы подтверждения. В первом случае момент завершения операции определяется наиболее медленной ветвью обслуживания, во втором – наиболее медленные ветви могут не определять время завершения пользовательского запроса, хотя продолжают формировать служебную нагрузку на сеть и узлы хранения.

Если число доступных узлов хранения N превышает число реплик R, то для каждой операции записи необходимо выбрать подмножество из R узлов. При равномерном циклическом выборе подмножеств из R узлов средняя интенсивность поступления запросов на каждый узел оценивается как

$$\lambda_i = \lambda\frac{R}{N},$$

где N – число доступных узлов хранения.

Для однородных узлов соответствующая загрузка ветви обслуживания определяется выражением:

$$\rho = \frac{\lambda R}{\mu N}.$$

Для случая, когда из N доступных узлов выбираются R ветвей обслуживания, используется расчетная аппроксимация среднего времени отклика Fork-Join-системы с $R<N$ [14], а учет неоднородности ветвей обслуживания согласуется с моделями Fork-Join-систем с переменными подзадачами [15]:

$$T_{FJ}^{R<N} \approx \frac{1}{\mu}\left(H_R + \frac{\rho}{2(1-\rho)}\left(S_{R,\rho} + (1-2\rho)S_{R(R-\rho)}\right)\right),$$

где H_R – гармоническое число порядка R; $S_{R,\rho} = \sum_{j=1}^{R}\frac{1}{j}$ – частичная сумма гармонического ряда; ρ – загрузка ветви обслуживания; $S_{R(R-\rho)} = \sum_{j=1}^{R}\frac{1}{j-\rho_{sub}}$ – соответствующая сумма с учетом загрузки ветвей обслуживания.

При этом в расчетах рассматривается устойчивый режим $\rho_{sub}<1$, поэтому знаменатели $(j-\rho_{sub})$ положительны при $j\geq 1$. Данное выражение применяется как приближенная расчетная оценка для сценариев, в которых число доступных узлов превышает число реплик.

В сценариях с неоднородной сетевой задержкой один из узлов характеризуется увеличенной задержкой передачи, а для сопоставительного расчета используется расчетная оценка обобщенной интенсивности обслуживания выбранного набора узлов. Для частного случая выбора одного узла со сниженной интенсивностью обслуживания и двух типовых узлов при R=3:

$$\mu_{eff}=\frac{3}{\frac{2}{\mu_f}+\frac{1}{\mu_s}},$$

где μ_s – интенсивность обслуживания узла с ограниченной производительностью; μ_f – интенсивность обслуживания типового узла.

В общем виде для одной ветви со сниженной интенсивностью обслуживания и $(R-1)$ типовых ветвей обслуживания используется выражение

$$\mu_{eff}=\frac{R}{\frac{1}{\mu_s}+\frac{R-1}{\mu_f}}.$$

Для выбора узлов используется принцип уравнивания загрузки ветвей обслуживания. В простейшем виде условие такого перераспределения можно записать как:

$$\rho_s=\rho_f \Rightarrow \frac{\lambda_s}{\mu_s}=\frac{R\lambda}{(N-1)\mu_f+\mu_s},$$

где ρ_s – загрузка ветви обслуживания, соответствующей узлу со сниженной интенсивностью обслуживания; ρ_f – загрузка ветви обслуживания, соответствующей типовому узлу; λ_s – часть входного потока, направляемая на узел со сниженной интенсивностью обслуживания.

Данное условие отражает стремление алгоритма снизить вероятность включения в операцию записи перегруженной ветви обслуживания и перераспределить поток в пользу узлов с меньшей текущей загрузкой и меньшим временем обслуживания.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ЗАПИСИ С РЕПЛИКАЦИЕЙ ДАННЫХ

Экспериментальная оценка операции записи с репликацией данных направлена на сопоставление времени ее выполнения при различных режимах подтверждения и стратегиях выбора узлов хранения реплик. В исследовании учитываются число доступных узлов N, уровень избыточности R, требуемый порог подтверждения W, интенсивность входного потока, состояние пользовательских очередей $Q_i(t)$, состояние служебных очередей $B_i(t)$, а также величина сетевой задержки между координатором и узлами хранения.

Таблица 2
Сценарии исследования

Сценарий	Назначение
Последовательная и параллельная запись	обоснование представления операции записи на основе модели Fork-Join
Строгий режим подтверждения (W=R)	оценка влияния повышенной задержки в одной из ветвей обслуживания
Пороговый режим подтверждения (W<R)	анализ влияния порогового подтверждения на время завершения операции
Выбор R узлов из N>R	оценка влияния выбора подмножества узлов на время записи
Неоднородность сетевых задержек	оценка влияния неоднородной задержки на одном из направлений связи на время записи и область перегрузки
Частичное снижение производительности одного узла	оценка изменения времени записи при сохранении узла в составе доступных ресурсов по сравнению с его исключением из обслуживания при R=3, N=4

Для сопоставления сценариев (табл. 2) использованы расчетная модель и имитационное моделирование. Расчетная модель применяется для анализа зависимости времени записи от интенсивности входного потока и сетевой задержки. Имитационная модель используется для проверки согласованности расчетных оценок и поведения системы при росте нагрузки.

В качестве базовой стратегии используется равномерное циклическое распределение запросов (Round-Robin). В качестве исследуемой стратегии рассматривается адаптивный выбор узлов хранения с учетом состояния пользовательских и служебных очередей. Для количественной оценки положительного эффекта от разгрузки типовых узлов используется относительное изменение времени записи:

$$G=\frac{T_{RR}-T_{alg}}{T_{RR}}\times 100\%,$$

где T_{RR} – время завершения операции записи при равномерном циклическом распределении; T_{alg} – время завершения операции записи при адаптивном выборе узлов хранения. Положительное значение G соответствует снижению времени записи при использовании адаптивного алгоритма.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ЗАПИСИ С РЕПЛИКАЦИЕЙ ДАННЫХ

Результаты представлены в виде зависимостей времени завершения операции записи от интенсивности входного потока, степени увеличения задержки на одном из направлений связи и стратегии выбора узлов. Основное внимание уделяется тем сценариям, которые показывают влияние параллельного характера записи, неоднородности сетевых условий и возможности адаптивного выбора ветвей обслуживания.

На первом этапе настоящего исследования сопоставлены последовательная и параллельная интерпретации операции записи. Последовательный вариант рассматривается как предельный случай, при котором обращения к узлам хранения осуществляются одно за другим. Параллельный вариант соответствует представлению на основе модели Fork-Join, при котором передача данных, локальная запись и возврат подтверждений по нескольким ветвям обслуживания происходят одновременно. Результаты сравнения приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что последовательная интерпретация приводит к завышенной оценке времени записи. При интенсивности входного потока 1 заявка/с время записи для последовательного варианта составляет 12 с, тогда как для параллельного варианта – около 6,57 с, что подтверждает необходимость анализа записи с последующей репликацией как параллельного процесса с синхронизацией подтверждений.

Далее, для проверки согласованности расчетной аппроксимации выполнено сопоставление расчетной и имитационной оценок времени записи. Такое сравнение необходимо, поскольку в Fork-Join-системах увеличение нагрузки приводит к нелинейному росту времени ожидания, а точное аналитическое описание для неоднородных ветвей обслуживания усложняется. Результаты сравнения расчетных и имитационных значений приведены на рис. 5.

Рисунок 4
Сравнение последовательной и параллельной организации операции записи

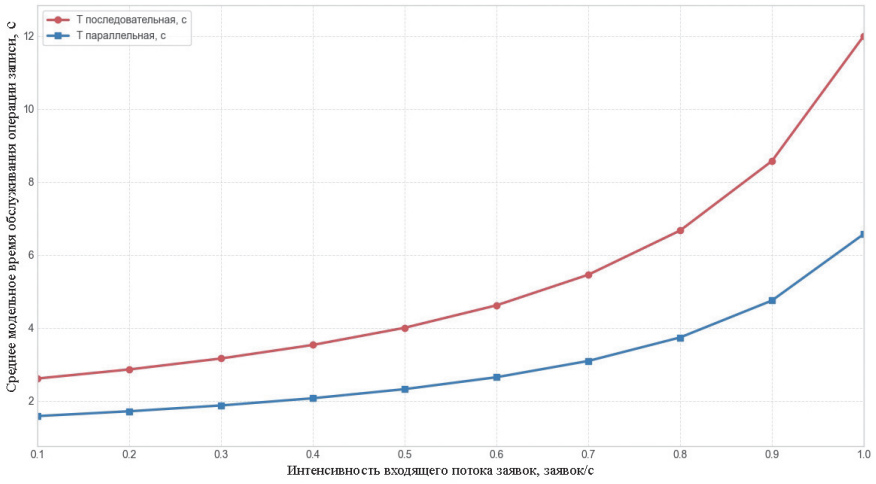
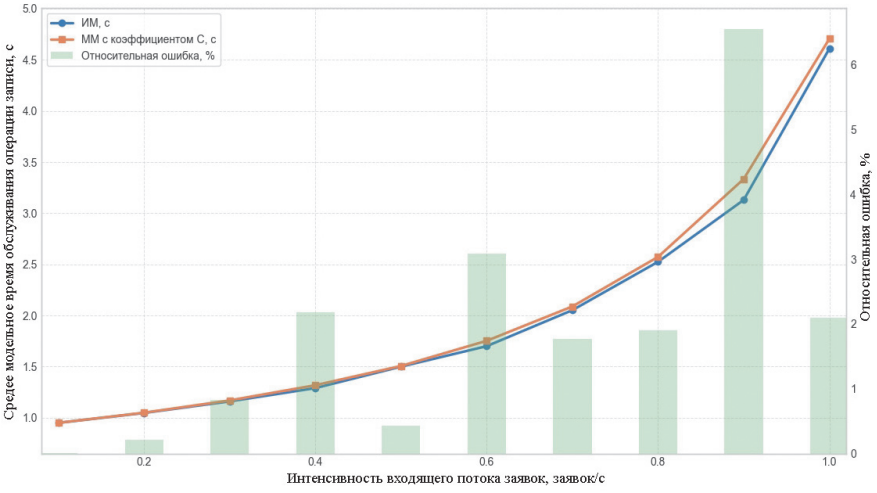


Рисунок 5
Сопоставление результатов математической и имитационной моделей при изменении интенсивности входящего потока заявок



Результаты на рис. 5 показывают близость расчетной (в легенде графика – ММ) и имитационной (в легенде графика – ИМ) оценок на малых и средних нагрузках. Для точек, представленных на рис. 5, наибольшее значение относительной ошибки получено при λ=0,9 заявок/с, что относится к переходной области, в которой очереди уже начинают заметно влиять на время записи, но режим еще не является устойчиво перегруженным. Поэтому результат имитационного моделирования в этой точке более чувствителен к конечной длине эксперимента и начальному переходному участку. При этом, по расчетным данным максимальное относительное расхождение в рассмотренном диапазоне λ от 0,1 до 1,5 заявок/с не превышает 9% (данное значение не вынесено на рис. 5, рисунок отражает общий характер зависимостей). При интерпретации данного результата учитывалось, что валидация модели не предполагает установления универсального порога допустимого

Рисунок 6
Влияние повышенной сетевой задержки в одной из ветвей обслуживания на время записи при равномерном циклическом распределении

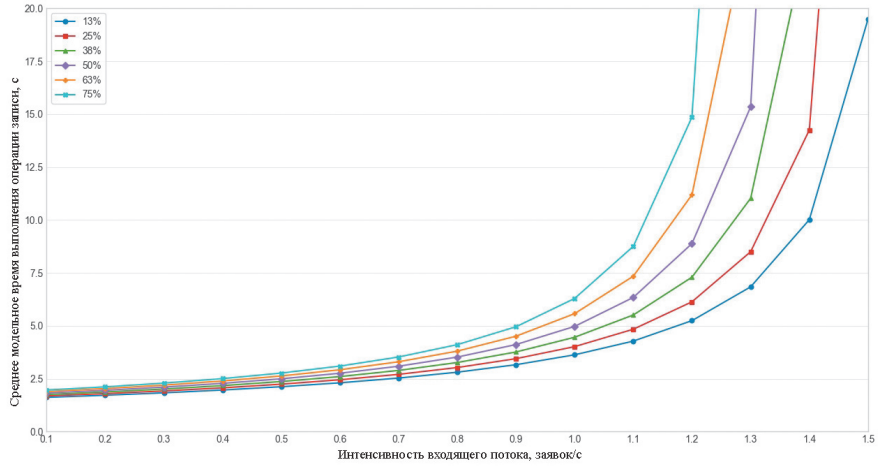
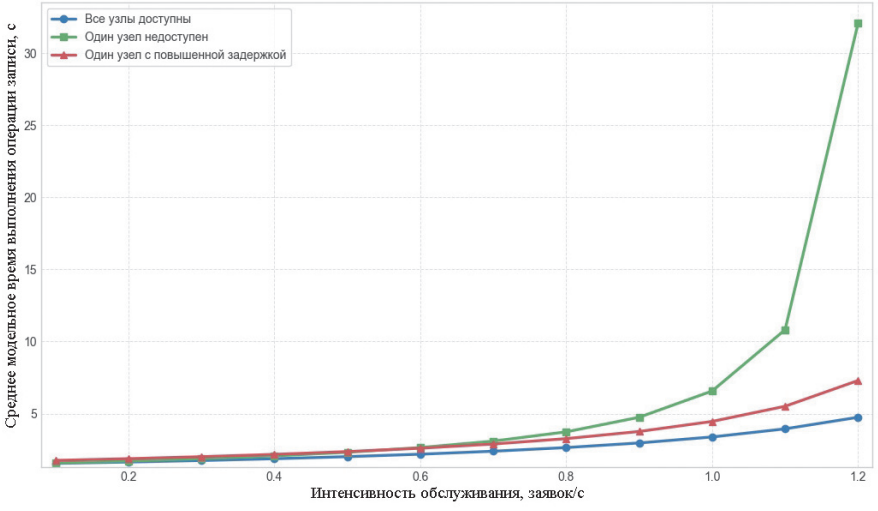


Рисунок 7
Влияние исключения узла и снижения интенсивности обслуживания одного узла на среднее время выполнения операции записи в конфигурации *R*=3 из *N*=4



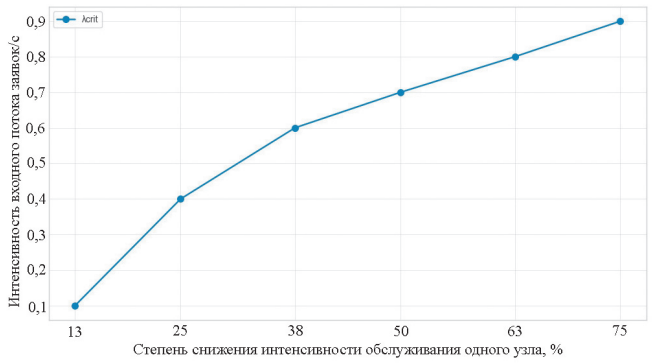
расхождения. Согласно [16], модель в пределах области применимости должна обладать удовлетворительным диапазоном точности, согласованным с предполагаемым применением модели. В настоящем исследовании расчетная модель используется для сопоставительной оценки сценариев, а не для точного прогнозирования абсолютных значений времени записи, поэтому полученное расхождение не препятствует анализу относительных изменений времени записи в заданных условиях эксперимента.

Следующий этап настоящего исследования связан с оценкой влияния неоднородности сетевых задержек на время выполнения операции записи. В данном сценарии одно из коммуникационных направлений характеризуется повышенной задержкой передачи, величина которой задается в относительных значениях (указаны в легенде графиков на рис. 6 в процентах и показывают степень увеличения сетевой задержки в одной из ветвей обслуживания по отношению к базовому значению задержки в типовой ветви). Например, значение 75% означает, что в одной ветви обслуживания задержка передачи данных и возврата подтверждения увеличена на 75% относительно базового значения, тогда как остальные ветви сохраняют типовые параметры.

На рис. 6 большее относительное увеличение задержки в одной ветви обслуживания связано со смещением области резкого увеличения времени записи к меньшим значениям входной нагрузки. При малых нагрузках различия между кривыми выражены умеренно, однако при увеличении интенсивности входного потока время записи возрастает нелинейно. Полученный результат объясняется тем, что в данном экспериментальном сценарии рассматривается строгий режим подтверждения (W=R), как наиболее чувствительный к неоднородности ветвей обслуживания. Поскольку операция завершается только после получения подтверждений от всех выбранных реплик, ветвь с повышенной сетевой задержкой может определять общее время завершения записи.

Дополнительный расчетный сценарий связан с оценкой влияния узла со сниженной интенсивностью обслуживания на время записи при выборе R=3 реплик из N=4 доступных узлов. В данном сценарии сопоставляются три конфигурации: три типовых узла, четыре типовых узла и четыре узла, один из которых характеризуется сниженной интенсивностью обслуживания. На рис. 7 приведены полученные зависимости среднего времени выполнения операции записи от интенсивности входного потока для указанных вариантов конфигураций. В легенде к рис. 7 вариант «Все узлы доступны» соответствует использованию четырех типовых узлов, вариант «Один узел недоступен» – использованию трех типовых узлов из четырех, а вариант «Один узел с повышенной задержкой» – ис-

Рисунок 8
Зависимость интенсивности входного потока от степени снижения интенсивности обслуживания одного узла



пользованию четырех узлов, один из которых формирует ветвь обслуживания с увеличенным временем завершения операции.

На малых нагрузках типовые узлы не перегружены, поэтому включение в схему узла со сниженной интенсивностью обслуживания («Один узел с повышенной задержкой» на рис. 7) преимущественно увеличивает время записи, т.е. при выборе такого узла момент завершения операции чаще определяется ветвью обслуживания с наибольшим временем завершения. При высоких значениях входной нагрузки конфигурация из трех типовых узлов («Один узел недоступен» на рис. 7) раньше достигает области перегрузки, поскольку входной поток распределяется между меньшим числом ветвей обслуживания. В варианте «Один узел с повышенной задержкой» (см. рис. 7) входной поток распределяется между четырьмя ветвями обслуживания, тогда как в варианте «Один узел недоступен» — между тремя ветвями. Поэтому при высоких нагрузках снижение времени записи за счет распределения потока между большим числом ветвей может компенсировать увеличение времени, связанное с использованием узла со сниженной интенсивностью обслуживания. Также необходимо отметить, что для всех рассмотренных вариантов конфигураций нелинейное увеличение времени записи в области высоких нагрузок связано с накоплением очередей при приближении интенсивности поступления запросов к интенсивности обслуживания узлов, а в Fork-Join-представлении дополнительно проявляется через необходимость синхронизации подтверждений по нескольким ветвям обслуживания.

Изменение характера влияния узла со сниженной интенсивностью обслуживания может быть описано через равенство расчетных времен записи для трехузловой и четырехузловой конфигураций:

$$T_{FJ}^{(3)}(\lambda_{crit}) = T_{FJ}^{(4)}(\lambda_{crit}).$$

Значение λ_{crit} определяет интенсивность входного потока, соответствующую смене знака влияния узла со сниженной интенсивностью обслуживания: при $\lambda < \lambda_{crit}$ включение такого узла преимущественно увеличивает время записи, а при $\lambda > \lambda_{crit}$ может снижать время за счет разгрузки остальных ветвей обслуживания и перераспределения потока между большим количеством ветвей обслуживания. Для различных значений снижения интенсивности обслуживания одного узла рассчитаны соответствующие значения λ_{crit}. Полученная зависимость приведена на рис. 8.

Из рис. 7 и 8 следует, что оценка состояния узла не должна ограничиваться бинарным представлением «работоспособное состояние» или «отказ», поскольку в туманной инфраструктуре возможны промежуточные состояния, связанные с увеличением задержки обслуживания или снижением интенсивности обработки запросов. Для туманной телекоммуникационной инфраструктуры принципиально важен учет такого промежуточного режима, при котором узел сохраняет возможность обслуживания, но изменяет распределение задержки и очередей, что дополнительно подтверждает необходимость адаптивного выбора узлов хранения на основе наблюдаемых состояний $Q_i(t)$ и $B_i(t)$.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты следует интерпретировать с учетом того, что в работе анализируется именно операция записи как процесс обслуживания в туманной телекоммуникационной инфраструктуре, поэтому сравниваются не только вычислительные характеристики узлов хранения, но и влияние ветвей обслуживания, сетевой задержки, служебного трафика и способа выбора множества реплик.

Во-первых, операция записи с репликацией должна анализироваться как параллельный процесс с синхронизацией подтверждений. Последовательная интерпретация завышает оценку времени записи и не отражает реальную организацию передачи данных на несколько узлов хранения.

Во-вторых, режим подтверждения $W=R$ в наибольшей степени зависит от ветви обслуживания с максимальным временем завершения. В данном режиме увеличение очереди на одном из узлов хранения или повышение сетевой задержки в соответствующей ветви может определять время завершения всей операции. Пороговый режим $W<R$ снижает зависимость времени завершения пользовательского запроса от ветвей, по которым подтверждения поступают позднее. Однако данный режим не устраняет служебный трафик репликации и нагрузку на сеть, что особенно актуально для сетей будущих поколений с распределенной обработкой данных и повышенными требованиями к задержке и устойчивости обслуживания.

В-третьих, при $N>R$ стратегия выбора узлов становится механизмом управления информационными потоками. Равномерное циклическое распределение не учитывает состояние узлов и коммуникационных направлений, тогда как выбор узлов на основе текущего состояния очередей позволяет перераспределять операции записи в пользу менее загруженных элементов инфраструктуры, поэтому эффект алгоритма наиболее заметен при выраженной сетевой неоднородности и росте входной нагрузки.

Рассмотрение выбора узлов как механизма управления информационными потоками согласуется с современными исследованиями перспективных сетей связи [17], в которых отмечается возможность распределения вычислительных и коммуникационных ресурсов для обеспечения требуемого качества предоставления услуг. В близкой постановке также рассматривается задача распределения трафика пользователей с учетом требуемого качества обслуживания, что соответствует рассматриваемому в настоящей статье выбору узлов хранения как механизму перераспределения пользовательского и служебного трафика между ветвями обслуживания.

Следует отметить, что преимущество адаптивного выбора узлов проявляется не во всех режимах одинаково. При однородных сетевых задержках, низкой входной нагрузке и отсутствии выраженных различий в состоянии очередей равномерное циклическое распределение может давать сопоставимые результаты. Наибольший эффект достигается в условиях сетевой неоднородности, снижения характеристик одной из ветвей обслуживания и наличия альтернативных узлов хранения.

С точки зрения телекоммуникационной системы подсистема хранения туманного уровня должна рассматриваться как часть сетевой инфраструктуры, влияющая на распределение трафика и использование коммуникационных ресурсов. Операция записи при репликации формирует пользовательский и служебный межузловой трафик, поэтому управление выбором узлов хранения является не только задачей организации хранения данных, но и задачей управления нагрузкой в туманной телекоммуникационной инфраструктуре.

Ограничением исследования является то, что в расчетной части основное внимание уделяется операции записи и сценарию повышения задержки на одном направлении связи. В реальной туманной инфраструктуре возможны одновременные изменения задержки, доступности и загрузки нескольких ветвей обслуживания. Дальнейшее развитие исследования связано с расширением сценариев неоднородности сетевых условий, учетом коррелированных отказов и сопоставлением временных характеристик операции записи с ранее рассматриваемыми оценками готовности цепочки обслуживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена операция записи данных в распределенной подсистеме хранения уровня туманных вычислений телекоммуникационной системы. Для ее описания использовано представление на основе модели Fork-Join, позволяющее учитывать параллельную передачу данных на несколько узлов хранения, ветви обслуживания операции записи и последующую синхронизацию подтверждений об успешности завершения операции.

Показано, что время завершения операции записи зависит от режима подтверждения, интенсивности входного потока, состояния очередей обслуживания, числа доступных узлов и неоднородности сетевых задержек. Выбор узлов, учитывающий состояние пользовательских и служебных очередей, позволяет уменьшить время записи в сценариях повышенной задержки на одном из направлений связи и высокой входной нагрузки. Дополнительный расчетный сценарий показывает, что влияние узла со сниженной интенсивностью обслуживания может быть неоднозначным: при малых нагрузках его включение увеличивает время записи, а при высоких нагрузках может снижать его за счет перераспределения потока между большим числом ветвей обслуживания.

Экспериментальные результаты подтверждают ограниченность равномерного циклического распределения запросов в условиях неоднородной сетевой задержки.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании и настройке распределенных подсистем хранения данных туманного уровня, функционирующих в составе телекоммуникационных систем. Предложенный подход позволяет рассматривать выбор узлов хранения как механизм управления информационными потоками и коммуникационными ресурсами в инфраструктуре пограничных и туманных вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елагин, В.С. Модель оценки сквозной задержки пакетов для цепочки NFV узлов в сетях пятого поколения / В.С. Елагин, А.В. Богачев, И.А. Белозерцев // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 23-30.

2. Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023). Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond.

3. ETSI GS MEC 003 V4.1.1 (2025-05). Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture.

4. Iorga, M. Fog Computing Conceptual Model. NIST Special Publication 500-325 /

M. Iorga, L. Feldman, R. Barton et al. – NIST, 2018. – 14 p.
5. IEEE 1934-2018. IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing.
6. Волков, А.Н. Туманные вычисления в сетях IMT-2030 для услуг телеприсутствия / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2024. – Москва, 2024. – С. 2295-2297.
7. DeCandia, G. Dynamo: Amazon's Highly Available Key-value Store / G. DeCandia, D. Hastorun, M. Jampani et al. // SOSP 2007: Proceedings of the 21st ACM Symposium on Operating Systems Principles. – P. 205-220.
8. Dean, J. The Tail at Scale / J. Dean, L.A. Barroso // Communications of the ACM. – 2013. – Vol. 56, No. 2. – P. 74-80.
9. Nelson, R. Approximate Analysis of Fork/Join Synchronization in Parallel Queues / R. Nelson, A.N. Tantawi // IEEE Transactions on Computers. – 1988. – Vol. 37, No. 6. – P. 739-743.
10. Varma, S. Interpolation Approximations for Symmetric Fork-Join Queues / S. Varma, A.M. Makowski // Performance Evaluation. – 1994. – Vol. 20, No. 1-3. – P. 245-265.
11. Алексеева, Н.Н. Математическая модель записи информации на узлы распределенной системы хранения данных / Н.Н. Алексеева, Н.М. Редругина, А.А. Савельева, И.Ф. Тарабанов // АПИНО-2022. Инфокоммуникационные сети и системы. – 2022. – Т. 1. – С. 65-70.
12. Редругина, Н.М. Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов / Н.М. Редругина // Труды учебных заведений связи. – 2023. – № 9(3). – С. 82-90.
13. Kleinrock, L. Queueing Systems. Volume 1: Theory / L. Kleinrock. – New York: Wiley-Interscience, 1975. – 429 p.
14. Горбунова, А.В. Обзор систем параллельной обработки заявок. Часть II / А.В. Горбунова, И.С. Зарядов, К.Е. Самуйлов // Вестник РУДН. Серия МИФ. – 2018. – Т. 26, № 1. – С. 13-27.
15. Varki, E. The M/M/1 Fork-Join Queue with Variable Sub-Tasks / E. Varki, A. Merchant, H. Chen. – https://www.cs.unh.edu/~varki/publication/2002-nov-open.pdf.
16. Sargent, R.G. Verification and validation of simulation models / R.G. Sargent // Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. – P. 124-137.
17. Воробьева, Д.М. Метод выбора структуры сети голографических услуг / Д.М. Воробьева, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 2-9.

Получено 29.05.2026;
принято к печати 03.06.2026

Experimental evaluation of a storage node selection algorithm for write operations with data replication in a distributed telecommunication infrastructure

V.S. Elagin, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), department of infocommunication systems, associate professor, Ph.D.; v.elagin@sut.ru
N.M. Redrugina, SPbSUT, department of infocommunication systems, associate professor, Ph.D.; redrugina.nm@sut.ru
A.A. Saveleva, SPbSUT, department of infocommunication systems, senior lecturer; saa@sut.ru

Abstract. A write operation with data replication in a distributed storage subsystem within the fog computing infrastructure of a telecommunication system is considered. The aim of the study is to evaluate the impact of storage node selection strategy on write completion time under different acknowledgement modes, heterogeneous network delays, and increasing input load. The write operation is represented using a Fork-Join model that accounts for parallel data transmission, local write execution, and acknowledgement receipt. Strict and threshold acknowledgement modes, uniform request distribution, and adaptive node selection based on user and service queues are compared. It is shown that increased delay in one service branch leads to an earlier growth in operation completion time. It is established that adaptive node selection reduces the impact of heterogeneous network conditions and shifts the overload region toward higher input load values. The results can be used for configuring data storage subsystems.

Keywords: fog computing, telecommunication system, distributed storage subsystem, replication, write operation, Fork-Join, network latency, information flow management.
For citation: Elagin, V.S. Experimental evaluation of a storage node selection algorithm for write operations with data replication in a distributed telecommunication infrastructure / V.S. Elagin, N.M. Redrugina, A.A. Saveleva // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 24-35. (in russian)

REFERENCES

1. Elagin, V.S. A model for estimating end-to-end packet delay for a chain of NFV nodes in fifth-generation networks / V.S. Elagin, A.V. Bogachev, I.A. Belozertsev // T-Comm: Telecommunications and Transport. – 2022. – Vol. 16, No. 3. – P. 23-30. (in russian)

2. Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023). Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond.

3. ETSI GS MEC 003 V4.1.1 (2025-05). Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture.

4. Iorga, M. Fog Computing Conceptual Model. NIST Special Publication 500-325 / M. Iorga, L. Feldman, R. Barton et al. – NIST, 2018. – 14 p.

5. IEEE 1934-2018. IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing.

6. Volkov, A.N. Fog computing in IMT-2030 networks for telepresence services / A.N. Volkov, A.E. Koucheryavy // Proceedings of the XIV All-Russian Conference on Control Problems VSPU-2024. – Moscow, 2024. – P. 2295-2297. (in russian)

7. DeCandia, G. Dynamo: Amazon's Highly Available Key-value Store / G. DeCandia, D. Hastorun, M. Jampani et al. // SOSP 2007: Proceedings of the 21st ACM Symposium on Operating Systems Principles. – P. 205-220.

8. Dean, J. The Tail at Scale / J. Dean, L.A. Barroso // Communications of the ACM. – 2013. – Vol. 56, No. 2. – P. 74-80.

9. Nelson, R. Approximate Analysis of Fork/Join Synchronization in Parallel Queues / R. Nelson, A.N. Tantawi // IEEE Transactions on Computers. – 1988. – Vol. 37, No. 6. – P. 739-743.

10. Varma, S. Interpolation Approximations for Symmetric Fork-Join Queues / S. Varma, A.M. Makowski // Performance Evaluation. – 1994. – Vol. 20, No. 1-3. – P. 245-265.

11. Alekseeva, N.N. A mathematical model of writing information to nodes of a distributed data storage system / N.N. Alekseeva, N.M. Redrugina, A.A. Saveleva, I.F. Tarabanov // APINO-2022. Infocommunication Networks and Systems. – 2022. – Vol. 1. – P. 65-70. (in russian)

12. Redrugina, N.M. A method for calculating temporal characteristics of service in service platforms for infocommunication transaction services with parallel request processing / N.M. Redrugina // Proceedings of Telecommunication Universities. – 2023. – No. 9(3). – P. 82-90. (in russian)

13. Kleinrock, L. Queueing Systems. Volume 1: Theory / L. Kleinrock. – New York: Wiley-Interscience, 1975. – 429 p.

14. Gorbunova, A.V. A review of parallel service systems. Part II / A.V. Gorbunova, I.S. Zaryadov, K.E. Samouylov // RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics. – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 13-27. (in russian)

15. Varki, E. The M/M/1 Fork-Join Queue with Variable Sub-Tasks / E. Varki, A. Merchant, H. Chen. – https://www.cs.unh.edu/~varki/publication/2002-nov-open.pdf.

16. Sargent, R.G. Verification and validation of simulation models / R.G. Sargent // Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. – P. 124-137.

17. Vorobieva, D.M. Method for a holographic service network structure selecting / D.M. Vorobieva, A.I. Paramonov, A.E. Koucheryavy // Electrosvyaz. – 2026. – No. 3. – P. 2-9. (in russian)

Особенности построения СКС для современных дата-центров

Д.А. Климов, ФГАУ НИЦ Телеком, заместитель генерального директора по научной работе, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), доцент, к.т.н.; klimovda@nic-t.ru
Р.В. Афанасьев, МТУСИ, магистрант; whitebull2005@mail.ru

УДК 004.04:621.315.2 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.004

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности построения структурированных кабельных систем (СКС) для современных центров обработки данных (ЦОД). Проанализированы основные архитектурные подходы согласно актуализированному стандарту ANSI/TIA-942-C, включая распределительные зоны MDA, HDA, EDA, IDA и ZDA. Выполнен сравнительный анализ медножильных и волоконно-оптических кабельных решений с учётом требований к пропускной способности, дальности передачи, плотности портов и энергоэффективности. Особое внимание уделено выбору оптических разъёмов нового поколения (VSFF, MPO), применению претерминированных сборок и модульно-кассетных систем. Показано влияние рейтингов отказоустойчивости (Rated-1 – Rated-4) на архитектуру кабельной инфраструктуры. Сформулированы перспективные направления развития СКС для дата-центров, включая экранированные кабели категории 8.2, одномодовое волокно внутри ЦОД и интеграцию с системами жидкостного охлаждения.*

Ключевые слова: *структурированная кабельная система, СКС, центр обработки данных, ЦОД, ANSI/TIA-942-C, волоконно-оптический кабель, витая пара, многомодовое волокно, одномодовое волокно, оптические разъёмы VSFF, отказоустойчивость, претерминированные системы, категория 8, магистральные соединения.*

Для цитирования: *Климов, Д.А. Особенности построения СКС для современных дата-центров / Д.А. Климов, Р.В. Афанасьев // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 35-40.*

ВВЕДЕНИЕ

Развитие облачных технологий и массовая цифровизация производственных процессов привели к тому, что объемы создаваемой информации ежегодно возрастают в геометрической прогрессии. Прогнозы отраслевых аналитиков свидетельствуют о том, что к концу 2026 г. глобальный объем создаваемых данных достигнет 181 триллиона гигабайт, причем значительная часть этого массива обрабатывается в специализированных вычислительных комплексах [1]. Центры обработки данных (ЦОД) по праву считаются главными узлами современной информационной инфраструктуры, поскольку обеспечивают непрерывное функционирование критически важных сервисов – от банковских транзакций до систем искусственного интеллекта. Как отмечают зарубежные исследователи, сети дата-центров отличаются от традиционных корпоративных сетей рядом специфических требований: масштабом (сотни тысяч серверов), разнообразием приложений, высокой плотностью мощности и повышенными требованиями к надежности [2].

Параллельно с ростом вычислительных мощностей меняются и требования к физической основе дата-центров. Если десятилетие назад основное внимание уделялось серверному оборудованию и системам охлаждения, то сегодня проектировщики все чаще обращаются к анализу кабельной инфраструктуры как фактору производительности. Структурированная кабельная система (СКС) определяет пропускную способность каналов связи между вычислительными узлами, задержки при передаче пакетов данных и, в конечном счете, общую эффективность ЦОД. Ограничения, заложенные на этапе проектирования кабельной инфраструктуры, невозможно компенсировать за счет модернизации активного оборудования, что делает грамотное построение СКС стратегически значимой задачей. Отсюда возникает потребность в систематизации знаний о принципах построения кабельной инфраструктуры, адаптированной к реалиям центров обработки данных.

АРХИТЕКТУРНЫЕ СТАНДАРТЫ И ЗОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКС В ЦОД

В общем случае структурированная кабельная система представляет собой «*иерархическую кабельную среду передачи электромагнитных сигналов в здании, разделённую на структурные подсистемы и состоящую из элементов - кабелей и разъемов*» [3]. Классический подход к построению СКС представлен на рис. 1, где использованы следующие обозначения: ТР – телекоммуникационная розетка (в рабочей зоне); ТП – точка перехода (место соединения, например, для смены типа кабеля или для организации консолидационных точек); РП – распределительный пункт (этажный, зданий, комплекса).

Топология СКС в ЦОД отличается от топологии СКС для офисных зданий. Согласно стандарту ANSI/TIA-942-C [4], принятому в 2024 г., информационная инфраструктура дата-центра включает три основные распределительные зоны: главную распределительную область (Main Distribution Area, MDA), горизонтальную распределительную область (Horizontal Distribution Area, HDA) и область распределения оборудования (Equipment Distribution Area, EDA) [4]. MDA выполняет функцию центрального узла, где располагаются магистральные коммутаторы, маршрутизаторы и оборудование операторов связи. HDA обеспечивает распределение трафика из внутренней магистрали по локальным линиям, длина которых ограничивается 100 м. EDA непосредственно обслуживает серверные стойки и системы хранения данных.

Помимо базовых распределительных зон, архитектура современного ЦОД может включать дополнительные элементы: помещение кабельного ввода (Entrance Room, ER), промежуточную распределительную область (Intermediate Distribution Area, IDA) и зоны консолидации (Zone Distribution Area, ZDA). Помещение ввода служит точкой разграничения ответственности между оператором связи и владельцем дата-центра. IDA применяется в крупных ЦОД для снижения длины горизонтальных кабельных трасс и упрощения администрирования. Зоны консолидации позволяют гибко адаптировать кабельную инфраструктуру к изменениям в размещении оборудования без полной перепрокладки линий. Пример базовой топологии центра обработки данных по стандарту ANSI/TIA-942-C показан на рис. 2 [4].

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕДНОЖИЛЬНЫХ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Выбор типа передающей среды в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики СКС. Как правило, в дата-центрах применяются два основных типа кабелей: медножильные (витая пара категорий 6A и выше) и волоконно-оптические (многомодовое волокно OM3/OM4/OM5 или одномодовое волокно OS1/OS2) – каждый тип обладает своей спецификой, которую необходимо учитывать при проектировании [5]. Так, оптоволоконные кабели обеспечивают ряд технических преимуществ:

- поддержка высокоскоростных протоколов 40 Gigabit Ethernet и 100 Gigabit Ethernet на значительных расстояниях без деградации сигнала;
- меньший диаметр и вес кабелей по сравнению с медножильными аналогами, что облегчает организацию кабельных трасс под фальшполом;
- невосприимчивость к электромагнитным помехам;
- отсутствие ограничений по заземлению и гальванической развязке между сегментами сети.

Рисунок 1
Топология СКС с трехуровневой иерархией подсистем

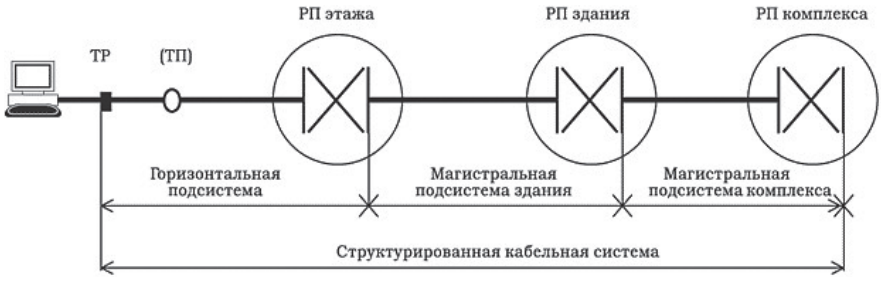
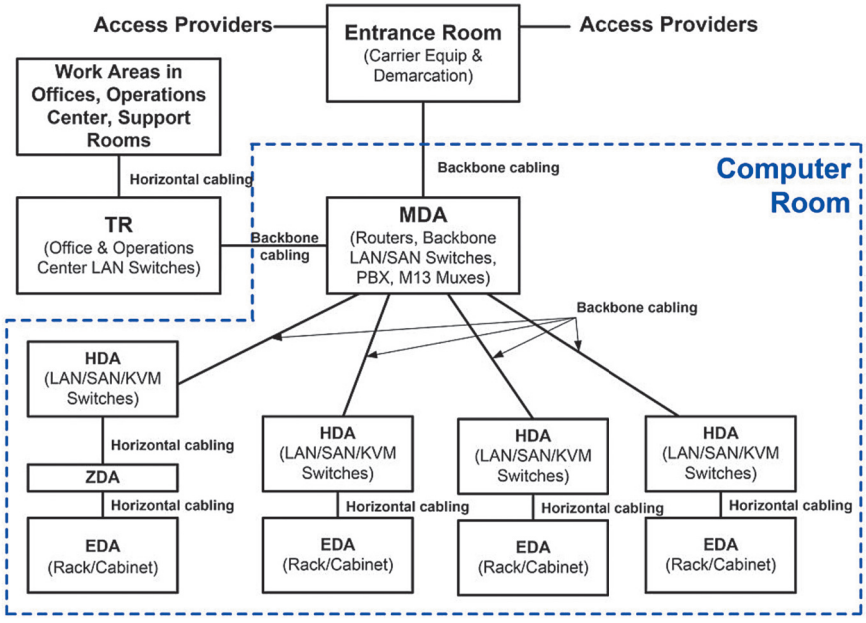


Рисунок 2
Топология центра обработки данных по стандарту ANSI/TIA-942-C



Медножильные кабели категорий 6A и 8 используются в горизонтальной подсистеме благодаря невысокой стоимости коннекторов, простому монтажу и возможности передачи питания по технологии Power over Ethernet (PoE). Стандарт TIA-942-C предусматривает использование кабелей категории 8 для поддержки 25 Gigabit Ethernet на расстояниях до 30 м, что покрывает типичные длины горизонтальных соединений внутри серверного зала. Кабели также подбираются в зависимости от отраслевой специфики предприятия, где расположен ЦОД: например, на предприятиях аэрокосмической отрасли, «*где необходимо передавать данные на скорости выше 1 Гбит/с, оптимальным вариантом для медной составляющей СКС будут служить кабели категории 6 (cat 6)*» [6].

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос выбора между многомодовым и одномодовым оптоволокном. Многомодовое волокно OM4 поддерживает передачу со скоростью 100 Гбит/с на расстояниях до 150 м при использовании трансиверов QSFP28, что достаточно для большинства внутренних соединений ЦОД. Одномодовое волокно применяется преимущественно для связи между зданиями или для подключения услуг операторов связи. Несмотря на меньшую стоимость самого одномодового кабеля по сравнению с многомодовым волокном аналогичной длины [5], современные трансиверы для многомодовых и одномодовых линий демонстрируют сопоставимую стоимость, особенно для скоростей 400G и выше. Современные тенденции показывают, что при скоростях 800 Гбит/с и выше разница в энергопотреблении между одномодовыми и многомодовыми трансиверами составляет всего 1–2 Вт, что делает многомодовое волокно предпочтительным решением для компактных машинных залов с длиной линий до 150 м. Применение многомодового волокна категории OM5 с технологией коротковолнового мультиплексирования SWDM позволяет сократить количество параллельных волокон минимум в четыре раза при передаче данных со скоростью 100 Гбит/с.

ОПТИЧЕСКИЕ РАЗЪЁМЫ И ПРЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ СБОРКИ

Для обеспечения требуемой плотности портов и удобства обслуживания СКС необходим выбор типа оптических разъемов. Сегодня традиционные разъемы LC-дуплекс, долгое время остававшиеся стандартом для дата-центров, постепенно уступают место разъемам сверхмалого форм-фактора (Very Small Form Factor, VSFF). К разъемам VSFF относятся SN, MDC и CS, обеспечивающие поддержку дуплексных или параллельных приложений с количеством волокон от 8 до 24 в одном коннекторе [7]. Разъем MDC (Mini Duplex Connector) отличается трехкратным преимуществом в плотности по сравнению с LC при сохранении совместимости с существующими стандартами. Применение магистральных кабелей с разъемами VSFF упрощает монтаж через кабельные каналы благодаря меньшему диаметру и весу сборок при большом количестве волокон. Разъемы данного типа изготавливаются в заводских условиях с гарантированными оп-

Технические параметры кабельных систем для ЦОД

Тип кабеля	Максимальная скорость	Предельная длина сегмента	Типичное применение в ЦОД
Категория 6A	10 Гбит/с	100 м	горизонтальная подсистема, подключение серверов
Категория 8	25–40 Гбит/с	30 м	соединения внутри стойки и между соседними стойками
OM3 (50/125 мкм)	100 Гбит/с	100 м	магистральные соединения средней дальности
OM4 (50/125 мкм)	100 Гбит/с	150 м	магистральные соединения внутри аппаратного зала
OM5 (50/125 мкм)	400 Гбит/с	100 м	перспективные приложения с мультиплексированием по длине волны
OS2 (9/125 мкм)	100 Гбит/с и выше	10 км и более	соединения между зданиями, подключение операторов связи

тическими характеристиками, что исключает вариативность полевого монтажа и сокращает время развертывания СКС.

Для трансиверов 400G, 800G и 1,6T применяются разъемы MPO16 (16 волокон) и 2×MPO8 (два разъема по 8 волокон), поддерживающие параллельную передачу данных по схеме Base8. В оптических кабелях типа SR (Short Range) используется параллельное многомодовое оптоволокно длиной до 100 м, в оптических кабелях типа DR (Data center Reach) – параллельное одномодовое волокно длиной до 500 м или 2 км [8–13], а в кабелях типа FR и LR – дуплексное одномодовое волокно с мультиплексированием по длине волны для расстояний до 2 км и 10 км соответственно [14, 15].

Модульно-кассетные и претерминированные решения постепенно вытесняют традиционные методы монтажа СКС в дата-центрах. Претерминированные сборки представляют собой кабельные сегменты с установленными на заводе коннекторами, прошедшие полное тестирование до отправки заказчику. Подобный подход сокращает время развертывания кабельной инфраструктуры с недель до часов, исключает ошибки полевого монтажа и гарантирует стабильные характеристики канала.

Стандарт ANSI/TIA-942-C устанавливает минимальную ширину шкафов в зонах MDA, IDA и HDA, равной 800 мм. Данное требование обусловлено необходимостью обеспечения достаточного пространства для организации кабелей и удобства обслуживания при высокой плотности подключений. Глубина шкафов варьируется от 1000 до 1200 мм в зависимости от размеров устанавливаемого оборудования и требований к воздушному потоку.

ТРЕБОВАНИЯ К НАДЁЖНОСТИ, ТРАССАМ И ТЕСТИРОВАНИЮ КАБЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Классификация дата-центров по уровню отказоустойчивости напрямую влияет на архитектуру СКС. Стандарт TIA-942 определяет четыре рейтинга надежности: Rated-1 (базовая инфраструктура), Rated-2 (резервируемые компоненты), Rated-3 (параллельное обслуживание) и Rated-4 (отказоустойчивость). Для ЦОД уровня Rated-3 требуется наличие минимум одного активного и одного резервного пути распределения телекоммуникаций, что означает дублирование кабельных трасс и коммутационного оборудования. Уровень Rated-4 предполагает полностью резервированную инфраструктуру по схеме 2N, где любой единичный отказ компонента не приводит к прерыванию сервиса.

Сравнительные характеристики различных типов кабельной продукции для дата-центров представлены в таблице.

Организация кабельных трасс в дата-центре требует тщательного планирования с учетом требований пожарной безопасности и эффективности охлаждения. При прокладке кабелей под фальшполом, где циркулирует холодный воздух, необходимо использовать кабели с пленум-оболочкой (low-smoke zero-halogen), минимизирующие выделение токсичных веществ при возгорании. Кабельные лотки и короба должны располагаться таким образом, чтобы не препятствовать воздушным потокам системы охлаждения. Современные ЦОД все чаще применяют надпотолочную прокладку кабелей, что освобождает пространство под фальшполом исключительно для холодного воздуха.

Тестирование смонтированной кабельной системы проводится в соответствии с требованиями стандартов TIA и ISO. Для медножильных каналов выполняется верификация следующих параметров: затухание, переходное затухание на ближнем конце (NEXT), возвратные потери, задержка распространения сигнала. Оптоволоконные линии тестируются на затухание и обратное рассеяние методом рефлектометрии. Результаты измерений документируются и сравниваются с предельными значениями, установленными для соответствующей категории или класса канала. Несоответствие любого параметра нормативным значениям требует устранения дефекта до ввода системы в эксплуатацию.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СКС ДЛЯ ДАТА-ЦЕНТРОВ

Дальнейшее развитие СКС для дата-центров связано с несколькими технологическими направлениями:

- внедрение экранированных медных кабелей категории 8.2 с поддержкой 40 Гбит/с;
- расширение применения одномодового оптоволокна внутри ЦОД благодаря снижению стоимости трансиверов;
- интеграция кабельной инфраструктуры с системами жидкостного охлаждения и иммерсионного охлаждения.

Обобщая, отметим, что СКС формирует физический фундамент телекоммуникационной инфраструктуры современного дата-центра. Грамотное проектирование СКС с учетом прогнозируемого роста нагрузок позволяет владельцам дата-центров избежать дорогостоящих реконструкций и сохранить конкурентоспособность инфраструктуры в условиях непрерывного увеличения объемов обрабатываемых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что структурированная кабельная система является критическим элементом инфраструктуры ЦОД, определяющим пропускную способность, задержки и масштабируемость. Современный стандарт ANSI/TIA-942-C задаёт архитектуру с зонами MDA, HDA и EDA, а для крупных объектов – дополнительными IDA и ZDA, что обеспечивает гибкость администрирования и упрощает изменения конфигурации.

Выбор передающей среды должен базироваться на требованиях к скорости, дальности и энергоэффективности: многомодовое волокно OM4/OM5 предпочтительно для внутренних соединений длиной до 150 м, одномодовое – для соединений между зданиями и подключения к сетям операторов связи, а медные кабели категории 8 эффективны на коротких (до 30 м) участках. Переход на разъёмы VSFF, претерминированные сборки и резервирование трасс (для дата-центров с уровнями надежности Rated-3 и Rated-4) значительно повышает плотность, скорость монтажа и надёжность.

Перспективными направлениями остаются внедрение экранированных кабелей категории 8.2, использование одномодового волокна внутри ЦОД и интеграция СКС с системами жидкостного охлаждения. Грамотно спроектированная СКС гарантирует долгосрочную работоспособность дата-центра и минимизирует риски дорогостоящих реконструкций при росте нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar, N. Big Data Statistics 2026 (Growth, Trends & Market Data) / N. Kumar / Demandsage (website). – https://www.demandsage.com/big-data-statistics/.

2. Xia, W. A Survey on Data Center Networking (DCN): Infrastructure and Operations / W. Xia, P. Zhao, Y. Wen, H. Xie // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, No. 1. – P. 640-656.

3. Попова, Ж.В. Структурированная кабельная система / Ж.В. Попова, А.И. Одинец // Наука, образование, бизнес. Материалы Всероссийской научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Издательство КАН, 2014. – С. 372-375. – EDN VQMFGJ.

4. ANSI/TIA-942-C. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. – TIA, 2024. – https://www.tiafotc.org/tia-standards-update/tia-942-c/.

5. Семенов, А.Б. Структурированные кабельные системы для центров обработки данных / А.Б. Семенов. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 232 с.

6. Журавель, О.Д. Структура центра обработки данных на предприятии аэрокосмической отрасли / О.Д. Журавель, А.В. Молчанский, А.А. Кальфа // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2020. – № 5-2(61). – С. 77-81.

7. Sukhorukov, M. СКС для дата-центров: тренды 2024 / M. Sukhorukov / Хабр (сайт). – https://habr.com/ru/articles/798291/.

8. Семенов, А.Б. Метод расчета коэффициента технологического запаса длины горизонтального кабеля СКС / А.Б. Семенов // Электросвязь. – 2007. – № 6. – С. 34-37.

9. Зубилевич, А.Л. Экономические аспекты применения одномодовой волоконно-оптической техники в информационной системе машинного зала ЦОД / А.Л. Зубилевич, А.Б. Семенов, С.А. Сиднев, В.А. Царенко // Электросвязь. – 2022. – № 7. – С. 67-70.

10. Семенов, А.Б. Метод определения расхода горизонтального кабеля структурированных кабельных систем / А.Б. Семенов // Электросвязь. – 2025. – № 11. – С. 37-43.

11. Семенов, А.Б. LAN-КАБЕЛИ и их сертификация на безопасность / А.Б. Семенов, Д.В. Хвостов // Электросвязь. – 2025. – № 6. – С. 12-16.

12. Семенов, А.Б. Построение функциональной секции телефонной магистрали СКС / А.Б. Семенов // Электросвязь. – 2025. – № 1. – С. 35-40.

13. ISO/IEC 11801-1:2017. Information technology – Generic cabling for customer premises – Part 1: General requirements.

14. IEC 61753-1:2020 Amendment 1. Fibre optic interconnecting devices and passive components – Performance standard – Part 1: General and guidance.

15. Афанасьев, Р.В. Анализ принципов организации и электромагнитной совместимости перспективных структурированных кабельных систем / Р.В. Афанасьев, Л.О. Мырова // Электросвязь. – 2025. – № 12. – С. 47-53.

Получено 19.05.2026; принято к печати 27.05.2026

Features of structured cabling system design for modern data centers

D.A. Klimov, The M.I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication (NRCT), deputy director general for science, associate professor, Ph.D.; klimovda@nic-t.ru

R.V. Afanasyev, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), master's student; whitebull2005@mail.ru

Abstract. The article discusses the design features of structured cabling systems (SCS) for modern data centers. The main architectural approaches are analyzed in accordance with the updated ANSI/TIA-942-C standard, including the distribution areas MDA, HDA, EDA, IDA and ZDA. A comparative analysis of copper and fiber-optic cabling solutions is performed, taking into account the requirements for bandwidth, transmission distance, port density and energy efficiency. Special attention is paid to the selection of next-generation optical connectors (VSFF, MPO), the use of pre-terminated assemblies and modular cassette systems. The influence of reliability ratings (Rated-1 – Rated-4) on the cabling infrastructure architecture is shown. Promising directions for the development of SCS for data centers are formulated, including shielded category 8.2 cables, single-mode fiber inside the data center and integration with liquid cooling systems.

Keywords: structured cabling system (SCS), data center, ANSI/TIA-942-C, fiber-optic cable, twisted pair, multimode fiber, single-mode fiber, VSFF optical connectors, fault tolerance, pre-terminated systems, category 8, backbone connections.

For citation: Klimov, D.A. Features of structured cabling system design for modern data centers / D.A. Klimov, R.V. Afanasyev // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 35-40. (in russian)

REFERENCES

1. Kumar, N. Big Data Statistics 2026 (Growth, Trends & Market Data) / N. Kumar / Demandsage (website). – https://www.demandsage.com/big-data-statistics/.

2. Xia, W. A Survey on Data Center Networking (DCN): Infrastructure and Operations / W. Xia, P. Zhao, Y. Wen, H. Xie // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, No. 1. – P. 640-656.

3. Popova, Zh.V. Structured Cabling System / Zh.V. Popova, A.I. Odinets // Science, Education, Business. Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference of Scientists, Teachers, Postgraduates, Students, Industry and Communications Specialists Dedicated to Radio Day. – Omsk: KAN Publishing House, 2014. – P. 372-375. – EDN VQMFGJ. (in russian)

4. ANSI/TIA-942-C. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. – TIA, 2024. – https://www.tiafotc.org/tia-standards-update/tia-942-c/.

5. Semenov, A.B. Structured Cabling Systems for Data Centers / A.B. Semenov. – Moscow: DMK Press, 2014. – 232 p. (in russian)

6. Zhuravel, O.D. Data Center Structure in the Aerospace Industry Enterprise / O.D. Zhuravel, A.V. Molchansky, A.A. Kalfa // Current Scientific Research in the Modern World. – 2020. – No. 5-2(61). – P. 77-81. (in russian)

7. Sukhorukov, M. SCS for Data Centers: Trends 2024 / M. Sukhorukov / Habr (website). – https://habr.com/ru/articles/798291/ (in russian)

8. Semenov, A.B. Method of calculating a horizontal CSC cable length's technological reserve factor / A.B. Semenov // Electrosvyaz. – 2007. – No. 6. – P. 34-37. (in russian)

9. Zubilevich, A.L. Economic aspects of the use of single-mode fiber optic technology in the information system of the data center's computer room / A.L. Zubilevich, A.B. Semenov, S.A. Sidnev, V.A. Tsarenko // Electrosvyaz. – 2022. – No. 7. – P. 67-70. (in russian)

10. Semenov, A.B. A method for determining the consumption of horizontal cable in structured cabling systems / A.B. Semenov // Electrosvyaz. – 2025. – No. 11. – P. 37-43. (in russian)

11. Semenov, A.B. LAN cables and their safety certification / A.B. Semenov, D.V. Khvostov // Electrosvyaz. – 2025. – No. 6. – P. 12-16. (in russian)

12. Semenov, A.B. Construction of a functional section of the SCS telephone backbone / A.B. Semenov // Electrosvyaz. – 2025. – No. 1. – P. 35-40. (in russian)

13. ISO/IEC 11801-1:2017. Information technology – Generic cabling for customer premises – Part 1: General requirements.

14. IEC 61753-1:2020 Amendment 1. Fibre optic interconnecting devices and passive components – Performance standard – Part 1: General and guidance.

15. Afanasyev, R.V. Analysis of the principles of organization and electromagnetic compatibility of promising structured cable systems / R.V. Afanasyev, L.O. Myrova // Electrosvyaz. – 2025. – No. 12. – P. 47-53. (in russian)

Метод динамического переключения узлов для повышения энергоэффективности сети интегрированного доступа и транзита

В.А. Бесчастный, Российский университет дружбы народов (РУДН), доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности, к.ф.-м.н.; beschastnyy-va@rudn.ru
Д.Ю. Острикова, РУДН, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности, к.ф.-м.н.; ostrikova-dyu@rudn.ru
В.П. Козлов, РУДН, студент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности; 1132226428@rudn.ru
У.К. Морозова, РУДН, студент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности; morozova-uk@rudn.ru
Ю.В. Гайдамака, РУДН, профессор кафедры теории вероятностей и кибербезопасности, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, с.н.с., д.ф.-м.н.; gaydamaka-yuv@rudn.ru

УДК 654.16 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.005

Аннотация. *В данной работе рассматривается вариант развертывания узлов сетей интегрированного доступа и транзита (Integrated Access and Backhaul, IAB) вдоль городских улиц и демонстрируется, что сетью, спроектированной для удовлетворения потребностей пользователей в часы пик, можно эффективно управлять, обеспечивая значительную экономию энергии в остальное время суток. Для обоснования реализуемости данного решения, предназначенного для сотовых систем 5G/6G, применяются методы стохастической геометрии и теории массового обслуживания. Полученные численные результаты показывают, что динамическое переключение узлов IAB может привести к снижению электропотребления до 40% в зависимости от характеристик трафика и особенностей развертывания. Предложенная методология также позволяет поддерживать заданную верхнюю границу задержки транзита и высокую загрузку активных узлов IAB.*

Ключевые слова: *6G, IAB, миллиметровый диапазон волн, энергосбережение, инфраструктура.*

Для цитирования: *Бесчастный, В.А. Метод динамического переключения узлов для повышения энергоэффективности сети интегрированного доступа и транзита / В.А. Бесчастный, Д.Ю. Острикова, В.П. Козлов и др. // Электросвязь. – 2026. – №7. – С. 41-49.*

ВВЕДЕНИЕ

Использование высокочастотных диапазонов, таких как миллиметровый в (mmWave, 30–70 ГГц) и субтерагерцевый (sub-THz, 100–300 ГГц), в сотовых системах 5G/6G является практически единственным вариантом для удовлетворения растущих потребностей в передаче больших объемов пользовательского трафика [1, 2]. Эти радиодиапазоны, предоставляющие сотни мегагерц непрерывной полосы пропускания, потенциально могут обеспечить внедрение будущих приложений, для которых характерны экстремально высокие требования к скорости передачи данных по беспроводному каналу [3].

Использование высокочастотного миллиметрового диапазона волн в системах 5G New Radio (NR) и субтерагерцевого диапазона частот в будущих системах 6G требует уплотнения базовых станций для обеспечения бесперебойной связи с пользователями. Однако уплотнение сети радиодоступа (Radio Access Network, RAN) влечет за собой значительные капитальные затраты для сетевых операторов. Ожидается, что для снижения затрат на развертывание инфраструктуры такие услуги, как усовершенствованная мобильная широкополосная связь (eMBB) и массовые межмашинные коммуникации (mMTC), будут предоставляться по многозвеньевой схеме с использованием технологии сетей интегрированного доступа и транзита (Integrated Access and Backhaul, IAB) [4, 5]. Эта технология основана на использовании ретрансляционных узлов с урезанным функционалом, называемых узлами IAB, которые централизованно управляются базовой станцией (БС), называемой IAB-донором. Такие системы формируют беспроводную сеть на последней миле, эффективно используя радиоресурсы, доступные оператору связи [6, 7]. В городской среде системы IAB могут быть установлены вдоль дорог и проспектов для обеспечения бесперебойного покрытия конечных пользователей [8].

Обычно планирование сети радиодоступа осуществляется в расчете на условия трафика в часы наибольшей нагрузки (ЧНН) [8]. В городской среде это обычно соответствует утренним и вечерним периодам времени [9]. Однако в другое время суток, например в полдень или ночью, ресурсы системы оказываются избыточными, но БС остаются активными даже при небольшом спросе на трафик.

При этом в сетях IAB возможно динамическое управление топологией, поскольку в них реализовано централизованное управление на стороне IAB-донора [6, 8, 10]. Однако исследований, затрагивающих инфраструктурное энергосбережение в сетях IAB, пока нет.

Целью данного исследования является оценка потенциального энергосбережения на основе метода динамической реконфигурации топологии в сетях 5G NR IAB с полудуплексным режимом передачи

данных по радиоканалу. Предложенный подход может быть использован для анализа многозвеньевых технологий, работающих в условиях ограничений полудуплексного режима.

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ СЕТИ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Тенденция к уплотнению сетей в последнее время породила волну исследований механизмов энергосбережения на уровне инфраструктуры. В [11] исследовались методы снижения энергопотребления в сотовых сетях путем динамической активации и деактивации БС в зависимости от величины трафика. Авторы разработали математическую модель, учитывающую изменчивость трафика сети радиодоступа и плотность БС. В работе показано, что в условиях низкой интенсивности трафика может быть достигнута экономия энергии до 80% без ущерба для качества обслуживания. Предложенные в [11] стратегии могут быть адаптированы к любым колебаниям трафика и в целом достаточно просты для внедрения.

В работе [12] предложена новая энергоэффективная стратегия для программно-конфигурируемых сетей (Software-Defined Networks, SDN), которая заключается в динамической реконфигурации топологии сети на основе характеристик трафика с сохранением высокой надежности работы системы. Предложенный подход основан на математической модели, которая учитывает энергопотребление и ограничения надежности для определения тех БС, маршрутизаторов и каналов, которые могут быть безопасно деактивированы в условиях низкой интенсивности трафика. Компьютерное моделирование показало, что предложенный подход значительно снижает затраты энергии без ущерба для производительности или доступности сети. Заявленная экономия энергии, обеспечиваемая предложенным подходом, была в 2,07 и 4,63 раза выше по сравнению со статическими топологиями. Решение является масштабируемым и использует возможности централизованного управления архитектуры SDN.

Авторы [13] представили динамическую стратегию энергосбережения для сотовых сетей путем выборочной активации и деактивации БС на основе требований пользовательского трафика. В отличие от предыдущих подходов, авторы явно учитывали затраты энергии, связанные с активацией/деактивацией БС, именуемые «затратами на переключение». В работе сформулирована проблема минимальных энергетических затрат и предложено двухэтапное решение, сочетающее оптимизацию для каждого временного слота и решение задачи о потоке минимальной стоимости для минимизации общего потребления энергии. Результаты моделирования показали, что предложенный метод позволяет достичь значительной экономии энергии, сохраняя при этом качество обслуживания и эффективно справляясь с накладными расходами на переключение.

В [14] был предложен метод оптимизации энергоэффективности в сотовых сетях путем динамического управления работой БС и подключением пользователей. Авторы ввели функцию стоимости, которая позволяет установить баланс между величиной энергопотребления и задержкой. Они разработали распределенные алгоритмы выбора БС при подключении пользователей с учетом энергопотребления и эвристические алгоритмы для активации/деактивации БС. Результаты моделирования продемонстрировали, что предлагаемый подход позволяет снизить потребление энергии на 70–80% по сравнению со статическим подходом за счет изменения топологии, сохраняя приемлемую производительность обслуживания.

Авторы [15] предложили спектрально-эффективный механизм активации/деактивации БС, направленный на снижение потребления энергии в сотовых сетях с сохранением параметров качества обслуживания (Quality of Service, QoS) и спектральной эффективности. Подход позволяет динамически определять недоиспользуемые БС в периоды низкого трафика и деактивировать их, перераспределяя их радиоресурсы соседним активным БС для поддержания качества обслуживания пользователей.

Вышеупомянутые работы [11–15] подчеркивают, что проблема хорошо исследована в контексте традиционных развертываний на базе БС, каждая из которых имеет проводное соединение с опорной сетью. Однако, насколько известно авторам настоящей работы, нет исследований, оценивающих энергосбережение в сетях IAB, где каналы транзитной сети добавляют дополнительные ограничения на расстояние между БС при удовлетворении требований к передаче трафика в часы наибольшей нагрузки.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ IAB

Рассматривается типовое городское развертывание для систем IAB, где цепочки из IAB-донора и IAB-узлов развернуты вдоль улиц и проспектов, как показано на рис. 1, на фонарных столбах или на фасадах зданий. Каждая цепочка состоит из N узлов IAB, где N может варьироваться в зависимости от условий трафика в ЧНН. Предполагается, что высоты подвеса IAB-узлов и IAB-доноров одинаковы – h_A. Несущая частота составляет 28 ГГц, а полоса пропускания системы равна B_W. Предполагается, что IAB-донор и IAB-узлы работают с использованием схем модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS), определенных для 5G NR [16].

Также предполагается, что пешеходы и транспортные средства расположены случайно в соответствии с пуассоновским распределением с плотностями ρ_P и ρ_V соответственно.

На доноре/узлах IAB и абонентских терминалах (AT) установлены планарные антенные решетки [16] с коэффициентами усиления G_B и G_U соответственно. Согласно [17, 18] предполагается конусная модель антенны, где ширина луча определяется шириной луча по уровню половинной мощности (Half-Power Beam Width, HPBW) диаграммы направленности. Среднее усиление по HPBW задается формулой [19]:

$$G = \frac{1}{\theta^{+}_{3dB} - \theta^{-}_{3dB}} \int_{\theta^{-}_{3dB}}^{\theta^{+}_{3dB}} \frac{\sin(N_{(\cdot)}\pi\cos(\theta)/2)}{\sin(\pi\cos(\theta)/2)} d\theta,$$

где $N_{(\cdot)}$ – количество антенных элементов в вертикальной или горизонтальной плоскостях; θ^{+}_{3dB} и θ^{-}_{3dB} – верхний и нижний углы диаграммы направленности антенны с потерями мощности сигнала в 3 дБ относительно центра [19].

В работе также используется модель потерь распространения в городской застройке Urban Micro, стандартизированная 3GPP [20]. Согласно этой модели, потери распространения в зависимости от расстояния могут быть записаны как

$$L(y) = 10^{2\lg f_c + 3{,}24 + M_I}\, y^{\zeta},$$

где y – расстояние между БС и AT, измеряемое в трехмерном пространстве; f_c – несущая частота; M_I – запас помехоустойчивости; ζ=2,1 – показатель потерь распространения для состояния прямой видимости.

Средняя нагрузка трафика, измеряемая в пакетах в секунду, моделируется как

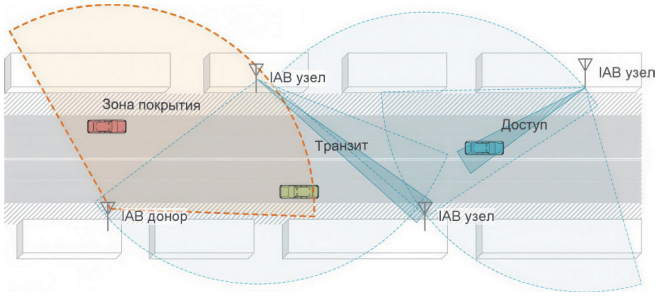
$$L_n(t) = \frac{\mu_t I_n}{2\lambda_F} \sum_{\tau\in\{P,V\}} \nu_\tau \rho_\tau \gamma_\tau, \qquad (1)$$

где μ_t – доля нагрузки в момент времени t относительно нагрузки в ЧНН; ν_τ – количество полос для движения соответствующего типа объектов (P – пешеходы, V – транспортные средства); ρ_τ – плотность AT соответствующих типов; γ_τ – коэффициент, отражающий степень вовлеченности пользователя (для $\tau=P$) и степень проникновения технологии (для $\tau=V$); λ_F – время между поступлением пакетов; I_n – радиус покрытия узлов IAB.

Чтобы исследовать влияние изменчивости нагрузки трафика, сначала предположим, что пиковая дневная нагрузка соответствует формуле (1) с коэффициентом γ_τ=1 ($\tau\in\{P, V\}$). Затем рассчитываются относительные коэффициенты γ_τ для каждого часа τ из 24-часового периода, используя статистику, представленную в [21]. Предполагается, что пользовательский пакетный трафик соответствует модели трафика FTP3 от 3GPP [22]. Соответственно пакет размером l_p=0,5 Мбайт генерируется каждые λ_F=30 мс.

Задержка представляет собой критически важную метрику производительности при работе с многозвенными системами связи, использующими ретрансляционные узлы. В работе сначала задается

Рисунок 1
Рассматриваемое развертывание системы IAB в городских условиях



верхняя граница средней задержки, что позволяет определить оптимальную топологию IAB-цепочки для условий трафика ЧНН. При этом основным рассматриваемым показателем эффективности в работе является среднее энергосбережение в течение суток.

МЕТОД ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Радиус r_n покрытия n-го узла IAB с индексом m_n схемы MCS определяется на основе отношения сигнала к помехам и шуму (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR), как предложено [23]:

$$r(m_n) = \sqrt{\left(\frac{PG_BG_U}{10^{2\lg(f)+\zeta}(N_0B_W + M_I)s_{m_n}}\right)^{2/\zeta} - (h_A - h_B)^2},$$

где P – излучаемая мощность узла IAB; G_B и G_U – коэффициенты усиления БС mmWave и AT соответственно; f и B_W – соответственно рабочая частота и полоса пропускания системы; ζ – показатель потерь распространения; M_I – запас помехоустойчивости; N_0 – тепловой шум; s_{m_n} – SINR, ассоциированный с m_n-ым индексом MCS n-го узла [16]; h_B – высота AT.

Затем расстояния между последовательными узлами БС n и (n+1) можно оценить как минимум их радиусов покрытия I_n=min($r(m_n)$, $r(m_{n+1})$). Получив радиус покрытия узла и плотности размещения AT и предположив, что только половина площади обслуживается одним узлом, можно оценить нагрузку трафика, обслуживаемого узлами IAB, используя (1).

Для исследования метрик производительности транзитного узла IAB-узел рассматривается как система массового обслуживания (СМО) в дискретном времени с бесконечной очередью и групповым обслуживанием Geo^X/Geo^Y/1/∞. Группа заявок поступает в систему в начале такта длиной Δ с вероятностью a. Заявки поступают группами длиной не более, чем $A=L_n\Delta$, где L_n определяется формулой (1), и обслуживаются группами длиной не более, чем B, при этом параметры A и B вычисляются по рабочей полосе пропускания и доступности радиоресурса во временной области с учетом полудуплексных ограничений и за-

висят от средней спектральной эффективности в зоне обслуживания узла. Предполагается, что на каждом такте ресурсы выделяются для передачи данных в рассматриваемом направлении независимо от предыдущих тактов с вероятностью b.

Введенная СМО может быть описана цепью Маркова в дискретном времени $S_Q(t)$, $t=0, 1, ...$, определенной над дискретным пространством состояний $S_Q(t)\in\{0, 1, ...\}$, обозначающих число заявок в системе непосредственно перед концом такта t. Вероятности q_{ij} переходов $S_Q(t)$, $t=1, 2, ...$ могут быть выведены как

$$q_{ij}=\mathrm{P}\{S_Q(t)=j\mid S_Q(t-1)=i\}=\begin{cases}\overline{a}+\sum\limits_{k=1}^{A}al_k b\sum\limits_{j=k}^{B}h_j, & i=j=0,\\ al_A\overline{b}, & i\geq 0, \quad j=i+A,\\ \overline{a}\overline{b}+\sum\limits_{k=1}^{A}al_k bh_k, & i\geq 1, j=i,\\ al_{j-i}\overline{b}+\sum\limits_{k=1}^{A-j+i}al_{j-i+k}bh_k, & 0\leq i<j<A+i,\\ \overline{a}b\sum\limits_{j=i}^{B}h_j+\sum\limits_{k=1}^{\min(A,B-i)}al_k b\sum\limits_{j=i+k}^{B}h_j, & 1\leq i<B, j=0,\\ \overline{a}bh_{i-j}+\sum\limits_{k=1}^{\min(A,B-i+j)}al_k bh_{i-j+k}, & 0<j<i<j+B,\\ \overline{a}bh_B, & j\geq 0, i=j+B,\\ 0, \text{ иначе}, \end{cases} \tag{2}$$

где $\overline{a}$ и $\overline{b}$ – дополнительные вероятности соответственно к a и b; l_k – вероятность поступления группы из $k=1, ..., A$ заявок; h_j – вероятность обслуживания группы из $j=1, ..., B$ заявок.

Используя вероятности переходов, определенные в (2), стационарное распределение вероятностей состояний системы

$$p_i=\lim_{t\to\infty}P\{S_Q(t)=i\}, i\geq 0,$$

может быть получено в следующем виде:

$$p_0=p_0\left(\overline{a}+\sum_{k=1}^{A}al_k b\sum_{j=k}^{B}h_j\right)+\sum_{i=1}^{B}p_i\left(\overline{a}b\sum_{j=i}^{B}h_j+\sum_{k=1}^{\min(A,B-i)}al_k b\sum_{j=i+k}^{B}h_j\right),$$

$$p_i=\sum_{m=\max(0,i-A)}^{i-1}p_m\left(al_{i-m}\overline{b}+\sum_{k=1}^{A-i+m}al_{i-m+k}bh_k\right)+p_i\left(\overline{a}\overline{b}+\sum_{k=1}^{A}al_k bh_k\right)+$$
$$+\sum_{m=i+1}^{B+i}p_m\left(\overline{a}bh_{m-i}+\sum_{k=1}^{\min(A,B-m+i)}al_k bh_{m-i+k}\right), i\geq 1.$$

Далее можно перейти к производящей функции (ПФ) стационарных вероятностей системы, которая может быть выведена как

$$P(z)=\frac{\sum\limits_{i=0}^{B-1}p_i\left(\overline{a}b\sum\limits_{j=i+1}^{B}h_j+\sum\limits_{k=1}^{min(A,B-i)}al_k b\sum\limits_{j=i+k+1}^{B}h_j\right)-\sum\limits_{i=1}^{B}\frac{1}{z^i}C_i\sum\limits_{k=0}^{i-1}p_k z^k}{1-\left(\overline{a}\overline{b}+\sum\limits_{k=1}^{A}al_k bh_k\right)-a\overline{b}L(z)-ab\sum\limits_{i=1}^{A-1}z^i\sum\limits_{k=i+1}^{A}l_k h_{k-i}-\sum\limits_{i=1}^{B}\frac{1}{z^i}C_i}, \tag{3}$$

где

$$L(z)=\sum_{i=1}^{A}l_i z^i, \quad \{l_i, i=1, ..., A\},$$

и

$$C_i=\overline{a}bh_i+\sum_{k=1}^{min(A,B-i)}al_k bh_{i+k}.$$

Из теоремы Руше следует, что знаменатель правой части формулы (3) имеет ровно $(A+B)$ нулей z_j ($j=\overline{0, A+B}$), причем $z_0=1, |z_j|<1$ при $j=\overline{1, B-1}$ и $|z_j|>1$ при $j=\overline{B, A+B}$. Подставляя нули знаменателя z_j, такие что $|z_j|<1$, в числитель (3) и используя условие нормировки, получаем невырожденную систему из B уравнений для нахождения p_i при $i=\overline{0, B-1}$:

$$\begin{cases} \sum\limits_{i=0}^{B-1} p_i \left(\overline{ab} \sum\limits_{j=i+1}^{B} h_j + \sum\limits_{k=1}^{\min(A,B-i)} al_k b \sum\limits_{j=i+k+1}^{B} h_j \right) - \sum\limits_{i=1}^{B} \frac{1}{z_j^i} C_i \sum\limits_{k=0}^{i-1} p_k z_j^k = 0, \\ P(1)=1, \end{cases}$$

где z_j, $j=1, ..., B-1$ – корни знаменателя ПФ $P(z)$ такие, что $|z_j|<1$. Решив эту систему, можно получить стационарное распределение вероятностей $\{p_i, i=0, 1, ...\}$ числа заявок в системе.

Затем средняя задержка $E[D]$ в системе может быть найдена как

$$E[D]=\Delta \sum_{i=0}^{\infty} p_i \left\lceil \frac{i+a\sum\limits_{i=1}^{A} il_i}{b\sum\limits_{i=1}^{B} ih_i} \right\rceil,$$

в то время как средняя доля используемых ресурсов $E[U]$ определяется выражением

$$E[U]=\sum_{i=0}^{\infty} p_i \min\left(\frac{i+a\sum\limits_{i=1}^{A} il_i}{b\sum\limits_{i=1}^{B} ih_i}, 1 \right).$$

ОПТИМИЗИРОВАННАЯ ТОПОЛОГИЯ ДЛЯ ЧНН

Используя указанную модель, можно численно решить обратную задачу, чтобы получить оптимальную конфигурацию развертывания в терминах числа узлов в цепочке со схемой MCS, позволяющей максимизировать длину покрытия в условиях ограничения на среднюю задержку.

Пусть множество всех возможных конфигураций MCS цепочки узлов IAB обозначим как $\mathbf{M}_N=\{\mathbf{M}=(m_1, ..., m_N) : 0\le m_n\le 15\}$, где $m_n=0$ представляет деактивированные узлы IAB с $n=1, ..., N$. Таким образом, задача поиска оптимальной конфигурации цепочки IAB $\hat{\mathbf{M}}$ может быть формализована как максимизация покрытия при удовлетворении ограничения за сквозную задержку:

$$\hat{\mathbf{M}}=\begin{cases} \max\limits_{\mathbf{M}\in\mathcal{M}_N} \sum\limits_{n=1}^{N} I(m_n), \\ \sum\limits_{n=1}^{N} I(m_n) E_n[D] \hat{L}_n < \delta_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\hat{L}_n=\max\limits_{0\le t<24} L_n(t)$ – нагрузка трафика в ЧНН, прибывающая на n-й узел; $\delta_{\max}$ – верхняя граница средней задержки.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ ВНЕ-ЧНН

Результаты, предоставленные в предыдущем разделе, позволяют использовать следующий простой метод инфраструктурного энергосбережения в системах IAB: поскольку использование оптимальной топологии, удовлетворяющей ограничениям средней задержки, требует тщательной настройки не только числа узлов IAB в цепочке, но и схемы MCS, оптимизирующей дальность покрытия, некоторые из узлов IAB могут быть деактивированы в разное время суток. Та же структура может использоваться для оценки числа узлов IAB, которые могут быть отключены в сети.

Обозначим расстояние между n-м узлом и ближайшим активным дочерним узлом K при конфигурации $\mathbf{M}$, таким, что $m_K>0$, как

$$\eta_n(\mathbf{M}, \hat{\mathbf{M}})=\sum_{j=n}^{K-1} I_j\left(\hat{\mathbf{M}}\right),$$

где $\hat{\mathbf{M}}$ – оптимальная конфигурация со всеми активными узлами, определяемая в (4).

Затем можно перейти к формулировке задачи оптимизации для реконфигурации топологии как минимизации количества активных узлов IAB в момент t, которая принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \sum\limits_{n=1}^{N} I\left(m_n\right) \underset{\mathbf{M}\in\mathcal{M}}{\to} \min, \\ \sum\limits_{n=1}^{N} I(m_n) E_n[D]\left(L(t)\right) < \delta_{\max}, \\ r\left(m_n\right) > \eta_n\left(\mathbf{M}, \hat{\mathbf{M}}\right),\ n=1, ..., N : m_n > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Заметим, что результирующая задача в (5) концептуально похожа на (4) с тем же ограниченным пространством состояний. Таким образом, методы ветвей и отсечений или ветвей и границ также могут использоваться для ее эффективного решения.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

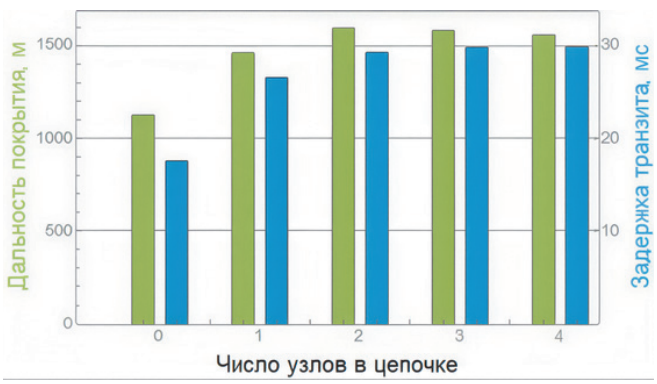
Параметры системы по умолчанию перечислены в таблице. Для определения интенсивности поступления сессий в дневное время использовалась стандартизированная 3GPP модель поступления пакетов FTP3 [21].

Начальное развертывание топологии IAB $\hat{\mathbf{M}}$ определяется таким образом, что позволяет обслуживать указанную плотность пешеходов и транспортных средств в условиях трафика ЧНН. При заданных значениях исходных параметров, топология $\hat{\mathbf{M}}$ состоит из четырех узлов (из донора IAB и трех узлов IAB), причем узлы IAB обеспечивают покрытие на расстоянии 1591 м и используют MCS $\hat{\mathbf{M}}=\{7, 9, 6\}$

Системные параметры по умолчанию

Параметр	Описание	Значение
B_W	рабочая полоса пропускания	400 МГц
M_I	запас помехоустойчивости	3 дБм
h_A	высота узла IAB	10 м
h_B	высота АТ	1,5 м
P	излучаемая мощность узла IAB	33 дБм
N	число узлов IAB в цепочке	3
$\hat{\mathbf{M}}$	начальная конфигурация MCS узлов IAB	{6, 9, 7}
N_0	тепловой шум	–174 дБм/Гц
G_B	коэффициент усиления антенны БС	11,58 дБи
G_U	коэффициент усиления антенны АТ	0,43 дБи
ζ	показатель потерь распространения	2,1
λ_F	время между поступлениями пакетов	30 мс
Δ	длительность такта	1 мс
B	вероятность обслуживания пакета на такте	0,25
γ_P	коэффициент вовлечённости пользователей	0,1
γ_V	уровень проникновения технологий	0,1
l_p	размер пакета	0,5 Мбайт
ρ_V	плотность транспортных средств	25 ед./км
ρ_P	плотность пешеходов	35 ед./км
$\delta_{\max}$	предельная допустимая транзитная задержка	30 мс

Рисунок 2
Количество IAB-узлов



со спектральной эффективностью S={1,4766; 2,4063; 1,1758} бит/Гц для транзитной сети между ними. Расчет оптимальных топологий и достигаемая при их использовании экономия энергии оценивается в условиях ограничения на задержку транзита в цепочке IAB не более чем $\delta_{\max}$=30 мс.

На рис. 2 представлены показатели эффективности для ЧНН топологии. Расстояния, на которые обеспечивается покрытие каждым из узлов, различаются из-за использования разных MCS на каналах транзитной сети. Это обусловлено граничными эффектами с обоих концов цепочки IAB. По мере увеличения количества узлов обеспечивается большее покрытие. Однако эта тенденция нелинейна, что объясняется динамикой трафика, поскольку задержки накапливаются вдоль цепочки. Можно заметить, что при максимальной допустимой задержке в 30 мс наиболее эффективной является цепочка из четырех узлов. Дальнейшее увеличение длительности задержки, скажем, до 50 мс, позволило бы создавать более длинные цепочки. Однако, как можно заключить, на практике число узлов IAB в цепочке обычно составляет от четырех до шести.

На рис. 3 показан общий объем трафика, генерируемого пользователями (левая ось Y), и количество активных узлов в цепочке, необходимых для его обслуживания (правая ось Y), в зависимости от времени суток. Можем отметить, что все узлы нужны только в самые загруженные часы, например, с 11:00 до 15:00 и около 21:00. Ночью между 1:00 и 7:00 нагрузка на трафик резко уменьшается, и в этом случае достаточно активировать только донор IAB и один узел. В остальное время используются донор IAB и два узла IAB. Общее относительное энергосбережение составляет 36,11% относительно статической топологии для ЧНН. Причем этот выигрыш может быть еще бóльшим по выходным дням, когда пользователи обычно генерируют меньше трафика.

Фактический трафик может колебаться в разное время суток, в то время как оптимальное число используемых узлов IAB может оставаться прежним, например, донор IAB и два узла IAB для временного интервала 16:00–20:00. Таким образом, важно исследовать влияние нагрузки и числа используемых узлов IAB в разное время суток на задержку и коэффициент использования. Так на рис. 4 показана общая транзитная задержка как функция от времени суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные развертывания сотовых систем характеризуются высоким энергопотреблением и связанными с ним выбросами углерода. Для снижения энергопотребления можно динамически активировать/деактивировать узлы, когда объем передаваемого трафика оказывается ниже, чем в часы наибольшей нагрузки. В работе предложен простой подход,

Рисунок 3
Количество активных узлов по часам (среднее энергосбережение 36,11%)

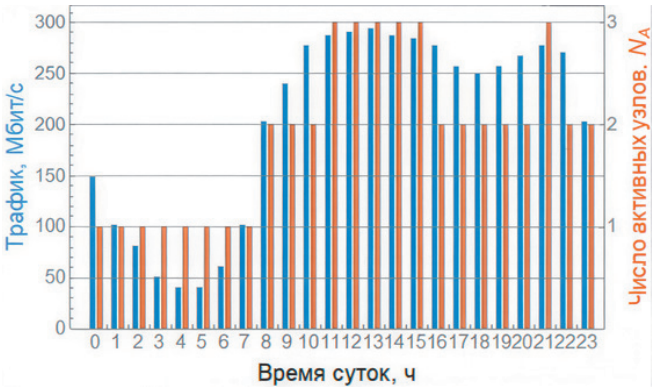
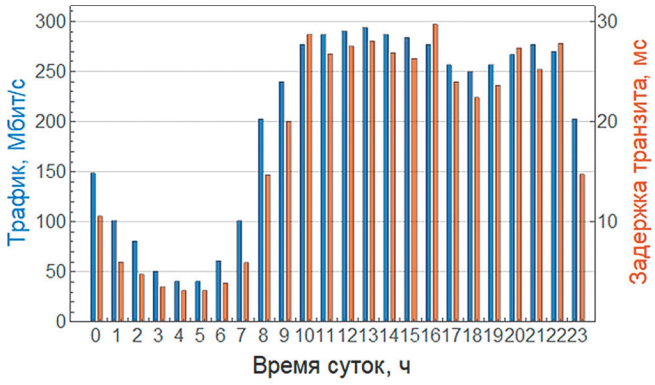


Рисунок 4
Транзитная задержка передачи данных по цепочке IAB в миллисекундах



позволяющий определить оптимальное число узлов IAB в цепочке, которые должны быть активными в любое время суток для обслуживания трафика, интенсивность которого меняется во времени.

Результаты численного эксперимента показали, что динамическая адаптация топологии сети IAB позволяет добиться энергосбережения до 40%, в зависимости от условий трафика и конфигурации системы. Несмотря на то, что большая часть сбереженной энергии приходится на ночное время, энергия также экономится и в дневное время из-за разницы в количестве трафика, генерируемого в разные часы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10084, https://rscf.ru/project/23-79-10084/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang, W. Terahertz communications and sensing for 6G and beyond: A comprehensive review / W. Jiang, Q. Zhou, J. He et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Vol. 26, № 4. – P. 2637-2728. – DOI: 10.1109/COMST.2024.3385908.

2. Sopin, E. User association and multi-connectivity strategies in joint terahertz and millimeter wave 6G systems / E. Sopin, D. Moltchanov, A. Daraseliya et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – Vol. 71, № 12. – P. 12765-12781. – DOI: 10.1109/TVT.2022.3195607.

3. Moltchanov, D. A tutorial on mathematical modeling of 5G/6G millimeter wave and terahertz cellular systems / D. Moltchanov, E. Sopin, V. Begishev et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, № 2. – P. 1072-1116. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3156207.

4. Samuylov, A. Empowering Near-URLLC IoT with 5G DECT-2020 NR: Current State and the Road Ahead / A. Samuylov, D. Moltchanov, A. Gaydamaka et al. // IEEE Communications Magazine. – 2025. – Vol. 63, № 2. – P. 130-136. – DOI: 10.1109/MCOM.002.2400385.

5. Kovalchukov, R. DECT-2020 new radio: The next step toward 5G massive machine-type communications / R. Kovalchukov, D. Moltchanov, J. Pirskanen et al. // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, № 6. – P. 58-64. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2100375.

6. Monteiro, V.F. Paving the way toward mobile IAB: Problems, solutions and challenges / V.F. Monteiro, F.R.M. Lima, D.C. Moreira et al. // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – P. 2347-2379. – DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3224576.

7. Yarkina, N. Dynamic Control for IAB Systems with Mixture of Latency- and Throughput-Sensitive Traffic / N. Yarkina, D. Moltchanov, V. Koucheryavy // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2025. – Vol. 74, Issue 10. – P. 16250-16264. – DOI: 10.1109/TVT.2025.3570333.

8. Ranjan, S. A flexible IAB architecture for beyond 5G network / S. Ranjan, P. Jha, A. Karandikar, P. Chaporkar // IEEE Communications Standards Magazine. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 64-71. – DOI: 10.1109/MCOMSTD.0009.2200018.

9. Kuber, T. Traffic prediction by augmenting cellular data with non-cellular attributes / T. Kuber, I. Seskar, N. Mandayam // 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417547.

10. Бесчастный, В.А. Вероятностные характеристики процесса обслуживания пакетов в узле сети IAB / В.А. Бесчастный, Е.А. Мачнев, Д.Ю. Острикова и др. // Электросвязь. – 2024. – № 1. – С. 43-46. – DOI: 10.34832/ELSV.2024.50.1.005.

11. Oh, E. Dynamic Base Station Switching-On/Off Strategies for Green Cellular Networks / E. Oh, K. Son, B. Krishnamachari // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2013. – Vol. 12, № 5. – P. 2126-2136. – DOI: 10.1109/TWC.2013.032013.120494.
12. Wang, Y. Energy-Efficient Method Based on Dynamic Topology Switching and Reliability in SDNs / Y. Wang, H. An, J. Ba et al. // IEEE Transactions on Sustainable Computing. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 427-440. – DOI: 10.1109/TSUSC.2021.3116325.
13. Yu, N. Minimizing Energy Cost by Dynamic Switching ON/OFF Base Stations in Cellular Networks / N. Yu, Y. Miao, L. Mu et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2016. – Vol. 15, № 11. – P. 7457-7469. – DOI: 10.1109/TWC.2016.2602824.
14. Son, K. Base Station Operation and User Association Mechanisms for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks / K. Son, H. Kim, Y. Yi, B. Krishnamachari // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2011. – Vol. 29, № 8. – P. 1525-1536. – DOI: 10.1109/JSAC.2011.110903.
15. Arvaje, F.R. A spectrum efficient base station switching-off mechanism for green cellular networks / F.R. Arvaje, B.S. Ghahfarokhi // 2017 7th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE). – DOI: 10.1109/ICCKE.2017.8167917.
16. Бакулин, М.Г. Интеграция технологии DFTN с MIMO для повышения спектральной эффективности в сетях следующего поколения / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.А. Резнев // Электросвязь. – 2025. – № 12. – С. 2-11. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.74.12.001.
17. Singh, S. Interference Analysis for Highly Directional 60-GHz Mesh Networks: The Case for Rethinking Medium Access Control / S. Singh, R. Mudumbai, U. Madhow // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2011. – Vol. 19, № 5. – P. 1513-1527. – DOI: 10.1109/TNET.2011.2122343.
18. Petrov, V. Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas / V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – Vol. 16, № 3. – P. 1791-1808. – DOI: 10.1109/TWC.2017.2654351.
19. Balanis, C.A. Antenna theory. Analysis and design / C.A. Balanis. – John Wiley & Sons, 2005. – 1064 c.
20. 3GPP TR 38.901 V17.0.0 (2022-03). Study on channel model for freqencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17).
21. Xu, F. Understanding Mobile Traffic Patterns of Large Scale Cellular Towers in Urban Environment / F. Xu, Y. Li, H. Wang et al. // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2017. – Vol. 25, № 2. – P. 1147-1161. – DOI: 10.1109/TNET.2016.2623950.
22. 3GPP TR 36.889 V16.0.0. (2018-12) Study on NR- based access to unlicensed spectrum.
23. Rois, J.G. Heterogeneous millimeter-wave/micro-wave architecture for 5G wireless access and backhauling / J.G. Rois, B. Lorenzo, F.J. González-Castano, J.C. Burguillo // 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – DOI: 10.1109/EuCNC.2016.7561028.

Получено 18.03.2026;
принято к печати 24.03.2026

A method of dynamic node switching to improve energy efficiency in NR IAB systems

V.A. Beschastnyi, RUDN University, department of probability theory and cybersecurity, associate professor, Ph.D.; beschastnyy-va@rudn.ru
D.Yu. Ostrikova, RUDN University, department of probability theory and cybersecurity, associate professor, Ph.D.; ostrikova-dyu@rudn.ru
V.P. Kozlov, RUDN University, department of probability theory and cybersecurity, student; 1132226428@rudn.ru
U.K. Morozova, RUDN University, department of probability theory and cybersecurity, student; morozova-uk@rudn.ru
Y.V. Gaidamaka, RUDN University, department of probability theory and cybersecurity, professor, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, senior research fellow, Dr.Sci.(Phys.-Math.); gaydamaka-yuv@rudn.ru

Abstract. This study investigates the deployment of Integrated Access and Backhaul (IAB) nodes along urban streets and demonstrates that a network designed to accommodate peak-hour traffic can be managed efficiently, yielding substantial energy savings during off-peak periods. To justify the feasibility of this solution, designed for 5G/6G cellular systems, stochastic geometry and queuing theory methods are used. Numerical results indicate that dynamic switching of IAB nodes can reduce power consumption by up to 40%, depending on traffic characteristics and deployment parameters. Moreover, the proposed methodology maintains a predefined upper bound on transit delays while ensuring high utilization among active IAB nodes.

Keywords: 6G, IAB, mmWave, sub-THz, power savings, infrastructure.
For citation: *Beschastnyi, V.A.* A method of dynamic node switching to improve energy efficiency in NR IAB systems / V.A. Beschastnyi, D.Yu. Ostrikova, V.P. Kozlov et al. // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 41-49. (in russian)

REFERENCES

1. Jiang, W. Terahertz communications and sensing for 6G and beyond: A comprehensive review / W. Jiang, Q. Zhou, J. He et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Vol. 26, № 4. – P. 2637-2728. – DOI: 10.1109/COMST.2024.3385908.

2. Sopin, E. User association and multi-connectivity strategies in joint terahertz and millimeter wave 6G systems / E. Sopin, D. Moltchanov, A. Daraseliya et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – Vol. 71, № 12. – P. 12765-12781. – DOI: 10.1109/TVT.2022.3195607.

3. Moltchanov, D. A tutorial on mathematical modeling of 5G/6G millimeter wave and terahertz cellular systems / D. Moltchanov, E. Sopin, V. Begishev et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, № 2. – P. 1072-1116. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3156207.

4. Samuylov, A. Empowering Near-URLLC IoT with 5G DECT-2020 NR: Current State and the Road Ahead / A. Samuylov, D. Moltchanov, A. Gaydamaka et al. // IEEE Communications Magazine. – 2025. – Vol. 63, № 2. – P. 130-136. – DOI: 10.1109/MCOM.002.2400385.

5. Kovalchukov, R. DECT-2020 new radio: The next step toward 5G massive machine-type communications / R. Kovalchukov, D. Moltchanov, J. Pirskanen et al. // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, № 6. – P. 58-64. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2100375.

6. Monteiro, V.F. Paving the way toward mobile IAB: Problems, solutions and challenges / V.F. Monteiro, F.R.M. Lima, D.C. Moreira et al. // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – P. 2347-2379. – DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3224576.

7. Yarkina, N. Dynamic Control for IAB Systems with Mixture of Latency- and Throughput-Sensitive Traffic / N. Yarkina, D. Moltchanov, V. Koucheryavy // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2025. – Vol. 74, Issue 10. – P. 16250-16264. – DOI: 10.1109/TVT.2025.3570333.

8. Ranjan, S. A flexible IAB architecture for beyond 5G network / S. Ranjan, P. Jha, A. Karandikar, P. Chaporkar // IEEE Communications Standards Magazine. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 64-71. – DOI: 10.1109/MCOMSTD.0009.2200018.

9. Kuber, T. Traffic prediction by augmenting cellular data with non-cellular attributes / T. Kuber, I. Seskar, N. Mandayam // 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417547.

10. Beschastnyi, V.A. A model of the packet service process at IAB node / V.A. Beschastnyi, E.A. Machnev, D.Yu. Ostrikova et. al. // Electrosvyaz. – 2024. – № 1. – P. 43-46. – DOI: 10.34832/ELSV.2024.50.1.005. (in russian)

11. Oh, E. Dynamic Base Station Switching-On/Off Strategies for Green Cellular Networks / E. Oh, K. Son, B. Krishnamachari // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2013. – Vol. 12, № 5. – P. 2126-2136. – DOI: 10.1109/TWC.2013.032013.120494.

12. Wang, Y. Energy-Efficient Method Based on Dynamic Topology Switching and Reliability in SDNs / Y. Wang, H. An, J. Ba et al. // IEEE Transactions on Sustainable Computing. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 427-440. – DOI: 10.1109/TSUSC.2021.3116325.

13. Yu, N. Minimizing Energy Cost by Dynamic Switching ON/OFF Base Stations in Cellular Networks / N. Yu, Y. Miao, L. Mu et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2016. – Vol. 15, № 11. – P. 7457-7469. – DOI: 10.1109/TWC.2016.2602824.

14. Son, K. Base Station Operation and User Association Mechanisms for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks / K. Son, H. Kim, Y. Yi, B. Krishnamachari // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2011. – Vol. 29, № 8. – P. 1525-1536. – DOI: 10.1109/JSAC.2011.110903.

15. Arvaje, F.R. A spectrum efficient base station switching-off mechanism for green cellular networks / F.R. Arvaje, B.S. Ghahfarokhi // 2017 7th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE). – DOI: 10.1109/ICCKE.2017.8167917.

16. Bakulin, M.G. Integrating DFTN with MIMO for spectral efficiency enhancement in next-generation wireless networks / M.G. Bakulin, V.B. Kreyndelin, A.A. Reznev // Electrosvyaz. – 2025. – № 12. – P. 2-11. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.74.12.001. (in russian)

17. Singh, S. Interference Analysis for Highly Directional 60-GHz Mesh Networks: The Case for Rethinking Medium Access Control / S. Singh, R. Mudumbai, U. Madhow // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2011. – Vol. 19, № 5. – P. 1513-1527. – DOI: 10.1109/TNET.2011.2122343.

18. Petrov, V. Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas / V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – Vol. 16, № 3. – P. 1791-1808. – DOI: 10.1109/TWC.2017.2654351.

19. Balanis, C.A. Antenna theory. Analysis and design / C.A. Balanis. – John Wiley & Sons, 2005. – 1064 c.

20. 3GPP TR 38.901 V17.0.0 (2022-03). Study on channel model for freqencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17).

21. Xu, F. Understanding Mobile Traffic Patterns of Large Scale Cellular Towers in Urban Environment / F. Xu, Y. Li, H. Wang et al. // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2017. – Vol. 25, № 2. – P. 1147-1161. – DOI: 10.1109/TNET.2016.2623950.

22. 3GPP TR 36.889 V16.0.0. (2018-12) Study on NR- based access to unlicensed spectrum.

23. Rois, J.G. Heterogeneous millimeter-wave/micro-wave architecture for 5G wireless access and backhauling / J.G. Rois, B. Lorenzo, F.J. González-Castano, J.C. Burguillo // 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – DOI: 10.1109/EuCNC.2016.7561028.

Методика формирования репрезентативного банка видеоданных для мониторинга пакетных сетей

В.А. Бабкин, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), старший преподаватель, к.т.н.; v.a.babkin@mtuci.ru
Е.П. Строганова, МТУСИ, профессор, д.т.н.; es@radiotest-mtuci.ru
Н.А. Шагров, МТУСИ, аспирант; shagrov.nikita@mail.ru

УДК 621.391.8 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.006

Аннотация. *Статья посвящена методике формирования структурированного банка типовых видеоданных, используемого в задачах мониторинга и оценки качества передачи в пакетных сетях. На основе проведенного анализа характеристик видеотрафика, взаимосвязи показателей качества, а также особенностей функционирования кодеков видеоданных предложен подход к организации структурированного банка типовых видеоданных на основе процессов захвата, аннотирования и хранения сетевых трассировок. Описаны принципы отбора образцов трафика с учетом разнообразия кодеков, разрешений, режимов управления битрейтом и типов контента. Предложена структура метаданных, обеспечивающая воспроизводимость экспериментов и совместимость сформированного банка типовых видеоданных с различными аналитическими инструментами. Такой банк типовых видеоданных может использоваться в качестве инструмента сравнительного анализа качества и мониторинга передачи видеоданных в пакетных сетях.*

Ключевые слова: *пакетные сети, мониторинг, банк видеоданных, качество, видеотрафик.*

Для цитирования: *Бабкин, В.А. Методика формирования репрезентативного банка видеоданных для мониторинга пакетных сетей / В.А. Бабкин, Е.П. Строганова, Н.А. Шагров // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 50-62.*

ВВЕДЕНИЕ

Доминирование видеотрафика в IP-нагрузке обусловливает рост требований пользователей к качеству видеосервисов и, как следствие, ставит перед операторами задачу непрерывного контроля качества доставки [1].

Мониторинг пакетных сетей при передаче видеоконтента требует не только измерения сетевых показателей, но и понимания того, как эти показатели отражаются на воспринимаемом пользователем качестве. Именно это соотношение между сетевыми характеристиками и пользовательским опытом обозначается в рекомендациях Сектора стандартизации Международного союза электросвязи (ITU-T) как качество обслуживания (QoS, Quality of Service) и качество восприятия (QoE, Quality of Experience) [2].

В связи с этим особую значимость приобретают исследования, направленные на анализ реальных характеристик видеотрафика в операторских сетях и выявление закономерностей его влияния на качество восприятия видеоконтента пользователем. В работе [3] проанализированы характеристики видеотрафика в условиях отечественных операторских сетей, рассмотрены особенности формирования видеопотока и поведение кодеков H.264, H.265 и VP9 при различных способах передачи видео. Как показано в [3], рекомендации ITU-T, регламентирующие параметры QoS и QoE, не отражают в полной мере реальные характеристики видеотрафика в операторских сетях, а также влияние типа контента и используемого кодека на динамику битрейта и структуру потока.

Между тем на практике исследователи сталкиваются с характерной проблемой: публично доступные наборы данных либо охватывают ограниченное число сценариев, либо не содержат полного набора параметров видеопотока, необходимого для проведения корректного анализа [4]. Отсутствие сведений о примененном кодеке, структуре группы изображений (group of pictures, GOP) или режиме управления битрейтом делает невозможным корректное сопоставление результатов, полученных разными исследовательскими группами. Вместе с тем даже зарубежные наборы данных, содержащие расширенный набор параметров, не отражают специфики российских операторских сетей [3].

Отсутствие наборов видеоданных, содержащих полный набор параметров, не позволяет проводить исследования и мониторинг показателей качества пакетных сетей для прохождения видеотрафика. Для решения задачи такого мониторинга требуется сформировать банк типовых видеоданных, характерных для российских операторских сетей. Под банком типовых видеоданных понимается структурированный набор трассировок видеотрафика и сопутствующих метаданных, обеспечивающий воспроизводимость экспериментов и сопоставимость результатов анализа.

Анализ существующих подходов показывает, что в настоящее время отсутствует единая система принципов формирования таких наборов данных, учитывающая одновременно разнообразие кодеков, типов контента и режимов передачи, а также требования к

полноте и согласованности описания параметров видеопотока. Существующие решения либо охватывают ограниченное число сценариев, либо не обеспечивают достаточного уровня детализации метаданных, необходимого для корректного сравнительного анализа.

В связи с этим целью работы является разработка методики формирования репрезентативного и воспроизводимого банка типовых видеоданных, ориентированного на условия функционирования операторских сетей.

Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи определения ключевых параметров видеотрафика, разработки принципов отбора и структурирования образцов, а также формирования требований к процедурам захвата, аннотирования и хранения данных.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ БАНКА ТИПОВЫХ ВИДЕОДАННЫХ

Банк типовых видеоданных используется в качестве опорного набора образцов, на основе которого выполняется анализ зависимостей «QoS→QoE» [3]. Для обеспечения применимости получаемых результатов к условиям реальной эксплуатации такой набор должен удовлетворять ряду взаимосвязанных требований.

Ключевым из них является репрезентативность, предполагающая охват всего спектра сценариев, характерных для российских операторских сетей: от IPTV стандартного разрешения до потоков 4K с адаптивным битрейтом, от видеоконференций до прямого вещания. По данным российского рынка онлайн-видео, доля сервисов с поддержкой адаптивного стриминга (ABR) к 2024 г. достигла 94%, что обусловливает необходимость включения в банк образцов с динамически изменяющимся битрейтом [5]. Воспроизводимость, в свою очередь, требует сопровождения каждого образца исчерпывающим набором метаданных, обеспечивающим возможность повторного захвата в идентичных условиях и верификации результатов с использованием сторонних инструментов. Наконец, совместимость с аналитическими средствами – Wireshark, tshark, библиотеками libpcap и Scapy – определяет выбор стандартного формата хранения сетевых трассировок [6, 7].

Таблица 1
Пространство рассматриваемых сценариев и параметров

Классы контента	Кодеки	Уровни разрешения	Режимы кодирования
- новостное вещание; - спортивные трансляции; - художественные фильмы; - видеоконференции	H.264/AVC; H.265/HEVC; VP9	SD (480p); HD (720p); Full HD (1080p); UHD (2160p)	CBR; VBR

Из сформулированных требований вытекает трёхуровневая логика организации банка данных, включающая захват исходных данных с минимальной потерей информации, структурированное описание параметров видеопотока и их нормализованное хранение. Каждый из указанных уровней решает самостоятельную техническую задачу, однако все они находятся в тесной взаимосвязи: допущенные на этапе захвата искажения не могут быть компенсированы на последующих стадиях обработки.

В основе формирования репрезентативного набора лежит учёт многообразия видеотрафика, определяемого несколькими независимыми измерениями: алгоритмом сжатия, разрешением, режимом управления битрейтом и типом контента. Совокупность этих параметров образует пространство сценариев передачи, которое банк типовых видеоданных должен покрывать достаточно равномерно.

В рамках настоящей работы рассматриваются классы контента, кодеки, уровни разрешения, режимы кодирования, приведенные в табл. 1.

Выбор указанных параметров обусловлен их существенным влиянием на характеристики видеотрафика в пакетных сетях. Так, кодек H.264, несмотря на появление более эффективных стандартов, остаётся наиболее распространённым в российских IPTV-сетях [8]. Кодек H.265 обеспечивает сопоставимое качество при снижении битрейта на 30–50% [9], что приводит к изменению распределения пакетов по размерам и интервалам между ними. Кодек VP9, поддерживаемый всеми современными браузерами и активно применяемый компанией Google в сервисе YouTube, формирует иную структуру группы изображений [10].

В свою очередь, тип контента определяет пространственную и временную сложность видеосигнала: спортивные сцены с высокой динамикой генерируют повышенное число B-кадров и создают импульсную нагрузку на сеть, тогда как новостные студийные сюжеты с малой подвижностью фона характеризуются стабильным и предсказуемым битрейтом [11].

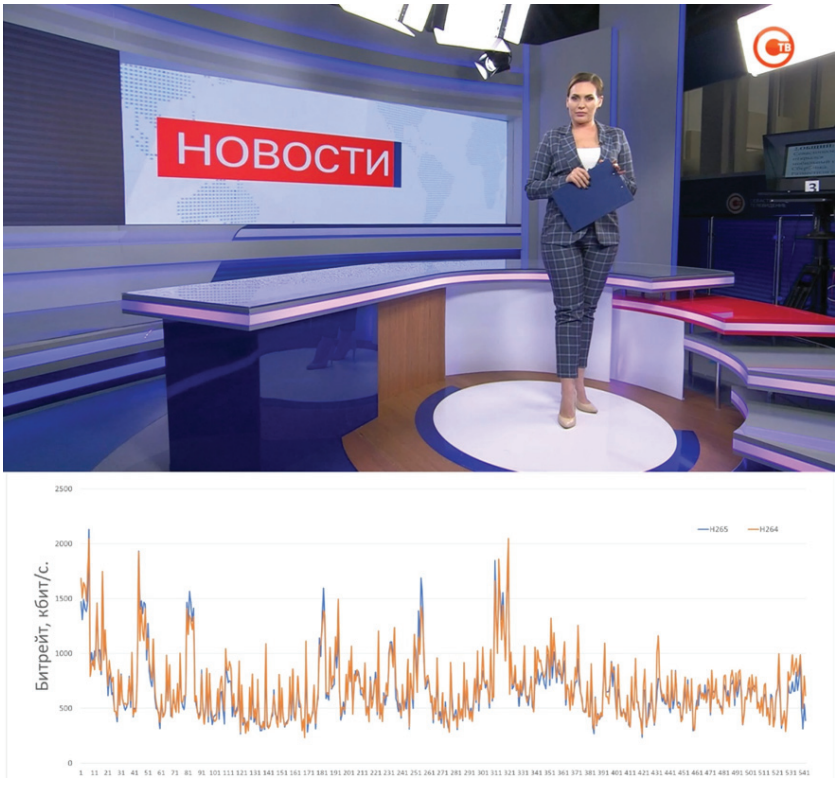
На рис. 1 представлен пример изменения битрейта во времени для динамичного видеоконтента (игровая сцена), закодированного с использованием кодеков H.264 и H.265. Наблюдаются значительные колебания битрейта и выраженные пики, достигающие значений свыше 4–5 Мбит/с, что связано с высокой сложностью сцены.

На рис. 2 показан аналогичный график для слабодинамичного контента (новостное вещание). В данном случае битрейт изменяется в существенно более узком диапазоне, а его значения остаются относи-

Рисунок 1
Изменение битрейта во времени для динамичного видеоконтента (игровая сцена), кодеки H.264 (оранжевый) и H.265 (синий)



Рисунок 2
Изменение битрейта во времени для слабодинамичного видеоконтента (новостное вещание), кодеки H.264 (оранжевый) и H.265 (синий)



тельно стабильными, что отражает низкую пространственно-временную сложность видеосигнала.

Чтобы сделать это разнообразие наглядным, полезно сопоставить типовые диапазоны сетевых характеристик для разных классов контента. В табл. 2 приведены ориентировочные параметры, характерные для производственных IPTV-сетей.

Данные табл. 2 показывают, насколько различаются требования к сетевым параметрам даже внутри одной категории «видеотрафик». Спортивные трансляции с вдвое меньшей длиной GOP, чем у художественных фильмов, требуют в 3–4 раза меньшего допустимого джиттера: короткая группа изображений означает, что каждый I-кадр несёт значительно больше пространственной информации и его потеря незамедлительно проявляется в виде артефактов [12, 13]. Видеоконференции, в свою очередь, работают с минимальной длиной GOP (порой всего 5 кадров), что делает их трафик схожим по временно́й структуре с онлайн-играми, а не с вещательным видео.

Полное покрытие пространства параметров предполагает формирование не менее трёх-пяти образцов для каждой уникальной комбинации характеристик видеопотока. При использовании трёх кодеков, четырёх разрешений, двух режимов кодирования и четырёх типов контента формируется 96 различных сценариев передачи; при минимальном объёме в пять образцов продолжительностью от одной до пяти минут это соответствует порядка 480 трассировкам. В результате совокупный объём хранилища при средней длительности фрагмента около трёх минут и среднем битрейте 5 Мбит/с составляет порядка 216 Гбайт необработанных данных в формате PCAP. Данная оценка получена исходя из количества рассматриваемых сценариев передачи и предполагаемого

объёма выборки для каждого сценария.

Указанные объёмы и разнообразие параметров видеотрафика обуславливают необходимость структурированного подхода к формированию банка типовых видеоданных. В связи с этим предлагается последовательность этапов, обеспечивающих получение, отбор и систематизацию видеотрафика, представленных на рис. 3.

Схема отражает последовательность этапов формирования банка типовых видеоданных, включающую захват видеотрафика, отбор типовых сценариев, формирование описаний видеопотоков и организацию их хранения.

Первый способ захвата видеотрафика основан на контролируемой генерации потоков в лабораторных условиях. Видеоконтент кодируется программными кодерами (FFmpeg с библиотеками x264, x265 или libvpx) с заранее заданными параметрами и передаётся через тестовую сеть. Захват сетевого трафика осуществляется с помощью утилиты tcpdump [7]. Основным достоинством данного подхода является полная прозрачность параметров передачи, поскольку кодек, разрешение, битрейт и тип контента известны заранее, а аннотирование не требует дополнительного анализа содержимого пакетов. Вместе с тем синтетическое происхождение таких данных ограничивает их применимость: трафик, сформированный в изолированной среде без фоновой нагрузки и очередей в маршрутизаторах, может существенно отличаться по статистике межпакетных интервалов от реальных операторских потоков.

Второй подход предполагает захват трафика в производственной среде действующей сети. Для этого в точке зеркалирования (SPAN-порт коммутатора или оптический сплиттер) разворачивается сенсор на базе утилит tcpdump или dumpcap. Такой способ позволяет получать об-

Таблица 2
Типовые сетевые характеристики видеопотоков по классам контента

Класс контента	Средний битрейт, Мбит/с	Длина GOP, кадров	Чувствительность к потерям	Допустимый джиттер, мс
Новостное вещание (SD/HD)	2–6	50–100	низкая (статический фон)	< 30
Спортивные трансляции (HD/FHD)	6–15	15–30	высокая (движение)	< 10
Художественные фильмы (FHD/4K)	8–25	60–120	средняя	< 20
Видеоконференции	0,5–4	5–15	очень высокая	< 5

Рисунок 3
Этапы формирования банка типовых видеоданных



разцы с реальной сетевой динамикой, включая случайные выбросы задержки, периодические перегрузки и нестабильность битрейта ABR-сессий [14, 15]. Однако его применение сопряжено с рядом ограничений: возникает необходимость анонимизации IP-адресов, а процесс аннотирования усложняется вследствие ограниченной доступности параметров кодирования при анализе трафика.

Оптимальная стратегия сочетает оба источника. Лабораторные образцы формируют базис банка с точно известными параметрами – они используются для калибровки алгоритмов автоматического извлечения метаданных и для верификации синтетического генератора трафика. Образцы из операторских сетей добавляют реализм и позволяют проверить, насколько адекватно лабораторная статистика отражает условия эксплуатации сети [16, 17]. Это разделение на две группы образцов зафиксировано в структуре метаданных через поле «источник захвата», которое принимает значения lab или production.

Сформулированные принципы организации банка типовых видеоданных определяют требования к процедурам получения исходных трассировок. В рамках настоящей работы предложен подход к организации захвата видеотрафика, обеспечивающий получение целостных, синхронизированных и репрезентативных данных, пригодных для последующего анализа и аннотирования.

Предложенный подход позволяет решить задачу формирования воспроизводимой базы сетевых трассировок за счёт использования пассивного зеркалирования, фильтрации трафика на уровне ядра операционной системы и обеспечения временной согласованности захвата.

Их практическая реализация невозможна без корректно организованного захвата сетевых пакетов.

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАХВАТА СЕТЕВОГО ВИДЕОТРАФИКА

Реализация описанных принципов организации банка на практике начинается с корректного захвата исходного трафика. Захват трафика осуществляется методом пассивного зеркалирования – без вмеша-

Таблица 3
Сравнительные характеристики инструментов захвата сетевых пакетов

Инструмент	Режим работы	Фильтрация	Точность временных меток	Типичное применение
tcpdump	интерфейс командной строки	BPF-выражения на уровне ядра	микросекундная	автономный захват, скриптинг
dumpcap	фоновый процесс	BPF, циклические буферы	микросекундная	долгосрочный мониторинг
tshark	интерфейс командной строки	BPF + Display Filters	микросекундная	пакетная обработка и экспорт
Wireshark	графический интерфейс	BPF + Display Filters	микросекундная	интерактивный анализ

тельства в процесс передачи между отправителем и получателем. Этот подход соответствует принципу «нейтральности наблюдателя»: измерительный инструмент не влияет на измеряемую систему, а все зафиксированные характеристики трафика отражают реальное поведение сети в конкретных условиях [6, 14].

Реализуется пассивное зеркалирование через утилиту tcpdump совместно с интерфейсом Berkeley Packet Filter (BPF). Механизм BPF реализует фильтрацию пакетов непосредственно в ядре операционной системы без их копирования в пространство пользователя [6]. Это позволяет захватывать трафик на высокоскоростных интерфейсах без значительных потерь пакетов даже при интенсивных потоках. Принципиальная схема захвата приведена в табл. 3.

Для задач формирования банка данных предпочтительна утилита tcpdump: она потребляет минимальные вычислительные ресурсы и допускает точную настройку параметров захвата через командную строку. Утилита dumpcap оправдана при длительных непрерывных сессиях, поскольку поддерживает кольцевые буферы с автоматической ротацией файлов по времени или достижению заданного размера [6].

Захват видеопотока, передаваемого по протоколу RTP поверх UDP, задаётся фильтром по диапазону портов 16384–32767, зарезервированному для динамических мультимедийных приложений согласно RFC 3550 [4]. Типичная команда для захвата RTP-трафика на интерфейсе eth0 с записью в файл с временны́м суффиксом имеет следующий вид:

tcpdump -i eth0 -s 0 -tttt -G 3600 -w /data/capture_%Y%m%d_%H%M%S.pcap «udp portrange 16384-32767»

Флаг *-s 0* обеспечивает захват пакетов в полном объёме без усечения, *-tttt* задаёт расширенный формат временно́й метки с указанием даты и времени. Параметр *-G 3600* инициирует ротацию файлов каждые 3600 с, что упрощает дальнейшее разбиение банка данных по временны́м сегментам [6, 14].

Ключевое преимущество технологии BPF состоит в том, что нерелевантные пакеты отбрасываются до их копирования из буфера сетевого адаптера в пространство пользователя. В условиях высоконагруженной магистральной сети с суммарной пропускной способностью 10 Гбит/с это снижает нагрузку на процессор захватывающего узла на порядок по сравнению с фильтрацией в пространстве пользователя [6, 18]. Число перехваченных пакетов остаётся стабильным даже при всплесках трафика, что является необходимым условием для обеспечения целостности трассировок.

Гибкость языка фильтров BPF позволяет задавать составные условия отбора. Для захвата трафика конкретной пары «источник – получатель» с ограничением по протоколу транспортного уровня, порту и адресам используются логические операторы AND, OR и NOT. Например, изоляция RTP-трафика от конкретного сервера стриминга с адресом 192.168.1.100 задаётся выражением *host 192.168.1.100 and udp portrange 16384-32767* [6]. Такая избирательность важна для банка данных: она гарантирует, что каждая трассировка содержит именно тот поток, которому соответствуют метаданные описания видеопотока.

На практике в тестовой среде нередко одновременно функционирует несколько видеопотоков с различными параметрами передачи. В этих условиях ключевое значение приобретает корректная организация процесса захвата, исключающая смешивание трассировок отдельных сессий. Для этого каждому потоку назначается отдельный фильтр с уникальной комбинацией IP-адреса и порта. Управление несколькими параллельными процессами захвата упрощается с использованием инструментов screen или tmux: каждый экземпляр tcpdump запускается в отдельной терминальной сессии, а имена выходных файлов формируются на основе параметров соответствующего потока. Такая схема позволяет одновременно фиксировать образцы для нескольких ячеек банка данных без риска перекрёстного загрязнения трассировок [14].

Наряду с изоляцией отдельных потоков не менее важным условием корректности дальнейшего анализа является обеспечение временной согласованности получаемых данных. Точный расчёт сетевых метрик, прежде всего задержки и джиттера, требует использования единого источника времени для всех точек захвата и последующей обработки. Расхождение системных часов между захватывающим узлом и анализатором даже на несколько миллисекунд приводит к систематическому смещению измеряемых значений задержки. Для устранения данной проблемы все узлы, участвующие в сборе трассировок, синхронизируются по протоколу NTP (Network Time Protocol), что обеспечивает типичную точность синхронизации на уровне 1–2 мс [19]. При требованиях к точности менее 1 мс (например, для измерения джиттера в видеоконференционных приложениях) необходимо использовать протокол PTP (Precision Time Protocol, IEEE 1588), обеспечивающий синхронизацию на уровне единиц микросекунд. Точность временны́х меток PCAP-файла определяется системными часами захватывающего узла в момент получения пакета в ядре, поэтому сетевые задержки в 10–20 мс между коммутаторами в тестовой топологии воспроизводятся в трассировках вполне достоверно даже при обычной NTP-синхронизации [4, 6].

Обеспечение временной согласованности на этапе захвата и последующей обработки данных напрямую связано с форматом их хранения. В рамках формируемого банка трассировки данные сохраняются в формате PCAP – двоичном контейнере, структура которого включает глобальный заголовок с параметрами захвата и последовательность записей пакетов [7]. Каждая запись содержит временну́ю метку с разрешением до одной микросекунды, фактическую длину захваченных данных, исходную длину пакета в сети и само содержимое, начиная с заголовков канального уровня. Такая организация данных обеспечивает возможность точного воспроизведения временной динамики потока и корректного расчёта сетевых метрик при последующем анализе.

Параллельно с классическим PCAP в банке данных применяется расширенный формат PCAP-NG (Next Generation), поддерживаемый Wireshark, начиная с версии 1.8. Формат PCAP-NG позволяет хранить трассировки с нескольких сетевых интерфейсов в одном файле, достигает точности временных меток до одной наносекунды и поддерживает произвольные текстовые аннотации в блоках опций [20, 21]. Последнее свойство имеет существенное значение: к трассировке можно прикрепить сведения об условиях захвата непосредственно в заголовке файла, не вынося их в отдельный документ.

Для долгосрочного хранения к файлам PCAP может применяться алгоритм gzip-сжатия, позволяющий существенно сократить объём данных без потери информации. Это делает размещение сформированного банка на одном хранилище практически осуществимым.

Таким образом, корректно организованный процесс захвата обеспечивает получение целостных и синхронизированных трассировок. Однако для их дальнейшего использования в задачах анализа и синтеза необходима формализация параметров видеопотока в виде структурированных метаданных, что требует разработки процедуры аннотирования.

АННОТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИДЕОПОТОКА НА ОСНОВЕ PCAP-ТРАССИРОВОК

Трассировка видеотрафика в формате PCAP содержит лишь необработанную последовательность сетевых пакетов и не включает явных сведений о параметрах видеопотока, таких как используемый кодек, разрешение или тип контента. В результате возникает задача извлечения и формализации этих параметров для последующего анализа и сопоставления образцов.

Под аннотированием в рамках настоящей работы понимается процесс извлечения, расчёта и фиксации параметров видеопотока и сетевых характеристик на основе анализа сетевых трассировок. Аннотирование включает идентификацию используемого кодека, определение разрешения и режима кодирования, расчёт битрейта и длины группы изображений (GOP), а также вычисление сетевых показателей, таких как задержка, джиттер и доля потерь пакетов.

Без структурированного описания видеопотока набор трассировок не может рассматриваться как полноценный банк типовых видеоданных: отсутствует возможность систематического сравнения образцов, а также их использования в задачах моделирования и обучения алгоритмов анализа QoS и QoE [13, 21].

В рамках настоящей работы разработана структура метаданных аннотированного видеотрафика, обеспечивающая полноту описания параметров видеопотока и их однозначную интерпретацию.

Предложенная структура основана на принципе минимальной достаточности: каждое поле либо автоматически извлекается из PCAP-файла, либо однозначно определяется на этапе захвата. Такой подход позволяет минимизировать объём ручной разметки и обеспечить воспроизводимость процесса аннотирования.

В зависимости от доступности информации аннотирование выполняется автоматически – на основе анализа заголовков протоколов и статистики трафика, либо с привлечением внешних сведений, задаваемых на этапе захвата (например, тип контента и условия передачи). Результатом аннотирования является формирование структурированного набора метаданных, связанного с соответствующей трассировкой видеотрафика (табл. 4).

Таблица 4
Структура метаданных аннотированного образца видеотрафика

Категория	Параметр	Источник	Формат
Идентификация	уникальный идентификатор образца	автоматически формируется системой	UUID v4
Идентификация	дата и время начала захвата	временная метка PCAP	ISO 8601
Видеопараметры	кодек	анализ заголовков RTP (Real-time Transport Protocol) и структуры видеопотока	строка: H264, H265, VP9
	разрешение	анализ SPS-блока (H.264/265)	ШхВ пикселей
	режим кодирования	анализ заголовков RTP	CBR / VBR
	средний битрейт	расчёт из PCAP	кбит/с
	длина GOP	определение интервала между ключевыми кадрами (IDR)	число кадров
Сетевые параметры	средняя задержка	RTCP-пакеты	мс
	джиттер	вычисление по RFC 3550	мс
	доля потерянных пакетов	анализ последовательности RTP	%
	пропускная способность	расчёт из PCAP	Мбит/с
Контент	тип контента	ручная разметка	новости / спорт / кино / конференция
	продолжительность образца	разность временны́х меток	с
Условия захвата	точка захвата	ручная разметка	описание топологии

Для обеспечения согласованности трассировок и их описаний все сопутствующие данные сохраняются в виде метаданных в формате JSON, который обеспечивает иерархическую структуру, человекочитаемость и совместимость с большинством библиотек обработки данных на языках Python и Java [21]. Каждый файл JSON связывается с соответствующим PCAP-файлом с помощью поля пути, что исключает возможность их рассогласования и упрощает последующую обработку.

В частности, утилита tshark, являющаяся консольным интерфейсом к декодирующему ядру Wireshark, позволяет экспортировать заголовочные поля в текстовый или CSV-формат [20]. Библиотека Scapy для языка Python, в свою очередь, предоставляет программный доступ к содержимому пакетов и поддерживает итеративную обработку трассировок.

Одним из ключевых этапов автоматизированного аннотирования является идентификация используемого видеокодека. В базовом случае она опирается на анализ поля типа полезной нагрузки (Payload Type, PT) в заголовке RTP: значения в диапазоне 96–127 соответствуют динамически согласуемым форматам, а сопоставление с SDP-описанием сессии, при его наличии в трассировке, позволяет установить конкретный кодек [4]. При отсутствии SDP применяется эвристический анализ сигнатур заголовков NAL (Network Abstraction Layer): для кодека H.264 IDR-кадры маркируются значениями типа 5, для H.265 – значениями типов 19 и 20 в соответствии с рекомендацией ITU-T H.265 [9]. Кодек VP9, в свою очередь, может идентифицироваться по характерной структуре заголовка суперкадра [10]. Длина GOP извлекается как расстояние между последовательными IDR-кадрами (Instantaneous Decoder Refresh) – ключевыми кадрами, декодирование которых не требует информации из предыдущих кадров. Средний битрейт вычисляется делением суммарного объёма полезной нагрузки RTP-пакетов на продолжительность трассировки. Джиттер рассчитывается по алгоритму, описанному в RFC 3550, как среднеквадратическое отклонение межпакетных интервалов с поправкой на вариацию задержки [4]. Эти три параметра – битрейт, длина GOP и джиттер – составляют ядро аннотации, поскольку именно они оказывают влияние на воспринимаемое качество видео [12, 21].

Помимо анализа заголовочных полей и сигнатур видеопотоков, важную роль в автоматизированном аннотировании играет исследование статистических характеристик трафика. В частности, распределение размеров пакетов является значимым признаком, отражающим особенности функционирования ис-

пользуемого кодека. Так, I-кадры в кодеках H.264 и H.265 занимают существенно больший объём по сравнению с P- и B-кадрами и формируют характерные «всплески» в размерах пакетов с периодичностью, соответствующей длине группы изображений GOP [22, 23]. Анализ подобных закономерностей позволяет дополнительно уточнять параметры кодирования и повышать точность классификации потоков.

Вместе с тем возможности автоматического извлечения метаданных остаются ограниченными рядом факторов. Часть параметров не поддаётся надёжному восстановлению исключительно на основе сетевых трассировок и требует ручного задания на этапе захвата. Прежде всего к ним относится тип контента, поскольку алгоритмические классификаторы могут допускать ошибки в условиях визуально однородных сцен: например, статичное интервью по сетевым характеристикам практически неотличимо от сеанса видеоконференции. Аналогичным образом топологическое описание точки захвата – сведения об операторе, типе подключения и положении узла в сети – также вносится вручную, так как данная информация недоступна при анализе пакетов [14].

Отдельного внимания заслуживает проверка корректности временных меток. Трассировки с явными аномалиями, например, с отрицательными межпакетными интервалами или с разрывом в последовательности порядковых номеров RTP, превышающим 10 пакетов, необходимо помечать флагом quality_warning в метаданных и исключать из выборки до выяснения причины аномалии. Чаще всего такие случаи объясняются переполнением буфера захватывающего узла в момент всплеска трафика или нарушением синхронизации системных часов [4, 6].

Разработанная в рамках настоящей работы система аннотирования обеспечивает формирование структурированных и полнофункциональных описаний видеопотоков, включающих параметры кодирования, характеристики сетевой передачи и сведения о типе контента. Предложенный подход позволяет перейти от необработанных сетевых трассировок к формализованному представлению видеотрафика, пригодному для автоматизированного анализа, сопоставления образцов и последующего использования в задачах мониторинга QoS/QoE.

Тем самым решается задача обеспечения полноты и согласованности описания видеопотоков в составе банка типовых видеоданных, что является необходимым условием его воспроизводимости и практической применимости.

Вместе с тем при увеличении объёма банка данных особое значение приобретают задачи эффективной организации хранения, индексирования, поиска образцов, включая проверку полноты аннотации, корректности временных меток и целостности сетевых трассировок.

ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ И СТРУКТУРИРОВАНИЕ БАНКА ТИПОВЫХ ВИДЕОДАННЫХ

С учетом требований к структурированности, воспроизводимости и масштабируемости банка данных предлагается использовать иерархическую файловую организацию, отражающую основные параметры отбора образцов. На верхнем уровне иерархии формируются каталоги по типу кодека, на втором – по разрешению, на третьем – по типу контента. Подобная структура упрощает формирование тематических подмножеств для проведения отдельных экспериментов: например, для исследования влияния потерь пакетов на передачу 4K-видео в кодеке H.265 достаточно обратиться к каталогу h265/2160p. Каждый образец предлагается хранить в виде пары файлов (PCAP с захваченными данными и JSON с метаданными), при этом их согласованность может контролироваться с помощью скрипта автоматической проверки целостности банка.

Для повышения эффективности поиска и отбора образцов дополнительно предлагается использовать централизованную систему индексации на основе реляционной базы данных SQLite, в которой метаданные всех трассировок хранятся в нормализованном виде. Такой подход позволяет выполнять сложные выборки – например, отбирать все образцы H.264 с битрейтом выше 8 Мбит/с, долей потерь менее 0,5% и типом контента «спорт» – за время, слабо зависящее от общего объёма хранилища [22]. В отсутствие индексации подобные операции потребовали бы последовательного анализа всех JSON-файлов, что при масштабировании банка становится вычислительно неэффективным.

Для объективной оценки степени охвата многомерного пространства параметров предлагается использовать систему количественных метрик. Коэффициент заполнения ячеек определяется как отношение числа уникальных комбинаций параметров, для которых в банке представлен хотя бы один образец, к общему числу возможных комбинаций. Так, при наличии данных для 90 из 96 сценариев данный показатель составляет 93,75%, что соответствует высокому уровню покрытия. Дополнительно вводится коэффициент статистической достаточности, характеризующий обеспеченность каждой ячейки необходимым числом наблюдений: при наличии менее трёх образцов, соответствующая комбинация параметров считается статистически недостаточно представленной [22, 24].

Предлагаемая система количественных метрик предполагает их регулярный пересчёт – например, при каждом пополнении банка новыми образцами. Такой подход позволяет своевременно выявлять неохваченные сценарии и целенаправленно планировать дозахват недостающих конфигураций. Тем самым обеспечивается сбалансированность структуры

банка и поддерживается его пригодность для обобщающих выводов и сравнительного анализа [17].

Практика показывает, что наибольший дефицит обычно наблюдается для редких комбинаций параметров. В частности, ограниченно представлены образцы 4K-видео с кодеком VP9 в режиме CBR, поскольку в реальных сетях VP9 преимущественно используется в сценариях адаптивного потокового вещания с переменным битрейтом. В подобных случаях восполнение недостатка образцов возможно главным образом за счёт лабораторной генерации контролируемых потоков [10, 23].

Наряду с задачами полноты покрытия, формирование банка типовых видеоданных в производственных сетях требует соблюдения нормативных ограничений. Захват сетевых пакетов сопряжён с выполнением требований Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных», поскольку трассировки, содержащие реальные IP-адреса абонентов и параметры сессий, могут быть отнесены к персональным данным [14]. В этой связи до начала хранения и анализа должна быть реализована процедура анонимизации либо получено согласие субъектов данных. Одним из возможных методов анонимизации IP-адресов является криптографическая псевдонимизация (CryptoPAN), при которой исходные адреса заменяются детерминированными псевдонимами с сохранением топологической структуры сети. Это позволяет проводить анализ маршрутизации и сетевой динамики без раскрытия персональных данных абонентов.

В этой связи при публикации результатов рекомендуется использовать образцы, полученные в контролируемой экспериментальной среде, либо данные, предоставленные оператором связи на законных основаниях. Соблюдение данных условий обеспечивает правомерность использования материалов и создаёт основу для их последующего распространения в научном сообществе.

Вместе с тем юридическая корректность должна сопровождаться обеспечением технической воспроизводимости экспериментов. Одним из инструментов её повышения является переход к расширенному формату PCAP-NG при хранении производственных трассировок, который представляет собой не только технологическое обновление, но и содержательное методическое решение. Поддержка блоков интерфейсной информации (Interface Description Block) позволяет фиксировать непосредственно в файле скорость захватывающего интерфейса, тип операционной системы и параметры фильтра BPF. Благодаря этому даже при повторном использовании данных через длительный промежуток времени становится возможным восстановление условий захвата без обращения к внешней документации [20, 24].

Для обеспечения корректности последующего анализа сохранённые трассировки проходят этап предварительной постобработки с использованием стандартных инструментов пакета Wireshark. В частности, утилита mergecap применяется для объединения нескольких файлов PCAP/PCAP-NG с восстановлением хронологии по временным меткам, editcap – для выделения заданных временных интервалов и удаления дублирующихся пакетов, а reordercap – для сортировки пакетов в строгом временном порядке при наличии незначительной рассинхронизации часов между узлами захвата [20].

Указанные операции формируют конвейер предварительной обработки, выполняемый до этапа аннотирования, поскольку нарушения порядка пакетов и наличие дубликатов приводят к искажению расчётов джиттера и длины GOP. Описанные архитектурные и технологические решения формируют основу для практического использования банка данных в задачах мониторинга.

Предложенная система хранения и индексации обеспечивает структурированное представление банка типовых видеоданных и его готовность к практическому использованию. Реализованные подходы позволяют эффективно выполнять отбор, группировку и анализ образцов видеотрафика в зависимости от параметров кодирования, характеристик передачи и типа контента.

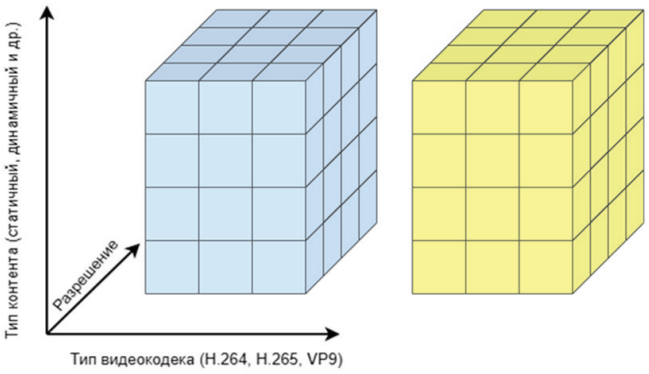
Это создаёт основу для применения сформированного банка в задачах мониторинга сетей, а также для проведения сравнительных исследований поведения различных кодеков в условиях сетевой деградации.

Для формализации структуры банка типовых видеоданных целесообразно рассматривать его как многомерное параметрическое пространство, образованное совокупностью ключевых характеристик видеотрафика. К таким характеристикам относятся используемый кодек видеосжатия, разрешение видеопотока, тип контента, а также режим кодирования. Каждая комбинация значений указанных параметров определяет отдельный сценарий видеопередачи, подлежащий включению в банка типовых видеоданных. Визуальное представление данной структуры приведено на рис. 4.

Банк типовых видеоданных представлен в виде дискретного многомерного пространства параметров видеотрафика. Трёхмерные решётки отражают комбинации ключевых параметров: используемого кодека видеосжатия, разрешения и типа видеоконтента. Каждая ячейка соответствует отдельному сценарию видеопередачи. Четвёртое измерение – режим кодирования (CBR и VBR) – представлено в виде отдельных слоёв пространства.

Вместе с тем практическое использование банка данных связано с рядом ограничений, обусловленных особенностями современных протоколов передачи, режимов кодирования и условий функционирования сетевой инфраструктуры.

Рисунок 4
Представление банка типовых видеоданных в виде многомерного параметрического пространства



ОБСУЖДЕНИЕ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ

Несмотря на комплексный характер предложенной методики, её практическая реализация сопровождается рядом ограничений, требующих отдельного рассмотрения. Наиболее существенным из них является неполный охват видеотрафика, передаваемого по протоколу QUIC, доля которого в российском сегменте интернета устойчиво возрастает с 2022 г., когда компания Google перевела основной видеотрафик сервиса YouTube на данный протокол [25]. В условиях использования QUIC заголовки транспортного уровня скрыты механизмами шифрования, вследствие чего идентификация кодека на основе анализа пакетов становится невозможной без доступа к ключевым материалам или SDP-описаниям. В результате для таких образцов отдельные поля аннотации, в частности сведения о кодеке и длине GOP, остаются незаполненными, что ограничивает их применимость в задачах классификации и статистического анализа.

Второе существенное ограничение связано с особенностями трафика с адаптивным битрейтом, широко используемого в системах потокового видеосервиса и видеоконференцсвязи. Подобные потоки характеризуются высокой неоднородностью, при которой битрейт может изменяться в несколько раз в пределах одной сессии. Корректное аннотирование таких образцов требует либо их сегментации на фрагменты с однородными параметрами, либо введения дополнительного поля «диапазон битрейта» в структуру метаданных [26, 27]. Оба подхода приводят к усложнению схемы аннотирования и требуют дополнительной методической проработки при дальнейшем масштабировании банка данных.

Третье ограничение относится к топологии и производительности системы захвата. Описанная методика в первую очередь ориентирована на лабораторную и тестовую среду с управляемыми условиями эксперимента. При ее внедрении в производственных операторских сетях возникает необходимость решения задач масштабирования инфраструктуры. Так, один узел захвата с интерфейсом 1 Гбит/с способен обслуживать порядка 50–100 одновременных видеопотоков в разрешении Full HD, тогда как крупные IPTV-платформы с десятками тысяч активных пользователей требуют распределённой системы захвата с централизованным хранилищем и механизмами балансировки нагрузки [28–31].

Вместе с тем перечисленные ограничения не снижают практическую значимость предлагаемого банка данных для задач мониторинга и анализа качества передачи видео. QUIC-трафик составляет лишь часть совокупного видеопотока в сетях операторов IPTV, которые по-прежнему широко используют протоколы RTP и MPEG-TS с доступными заголовками.

Проблема адаптивного битрейта может быть решена на уровне структуры метаданных без пересмотра базовой технологии захвата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы решена задача разработки методики формирования банка типовых видеоданных, предназначенного для задач мониторинга пакетных сетей. Предложен подход к формированию такого банка видеоданных, основанный на выделении параметрического пространства видеотрафика и множества сценариев передачи.

Разработанная методика формирования банка типовых видеоданных опирается на три взаимосвязанных принципа: воспроизводимость экспериментов, полноту аннотации и покрытие многомерного пространства параметров. Предложенная технология захвата видеотрафика с использованием интерфейса Berkeley Packet Filter и записью в формат PCAP обеспечивает сохранение полной информации о структуре трафика на уровне канального соединения. Разработанная система аннотирования с разделением автоматически извлекаемых и задаваемых вручную параметров позволяет формировать структурированные описания видеопотоков, пригодные для сопоставления и анализа.

Сформированный банк типовых видеоданных охватывает 96 уникальных сценариев (три кодека × четыре разрешения × два режима кодирования × четыре типа контента) с не менее чем тремя образцами на каждую комбинацию параметров. Это обеспечивает возможность проведения статистически обоснованных сравнений между классами видеотрафика и анализа влияния параметров кодирования и передачи на характеристики видеопотока.

Предложенный подход создаёт основу для применения банка данных в задачах мониторинга сетей и может быть использован при разработке и верификации методов оценки качества видеосервисов. В более широком контексте предложенная методика

восполняет пробел, характерный для отечественных телекоммуникационных исследований: отсутствие публично доступного аннотированного набора видеотрафика, сформированного применительно к актуальным кодекам и сценариям потребления контента в российских операторских сетях. Устранение этого пробела создает условия для воспроизводимых и сопоставимых исследований качества видеопередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин, В.А. Моделирование и мониторинг показателей сетевой производительности пакетных сетей на основе пороговой модели / В.А. Бабкин, Е.П. Строганова // Электросвязь. – 2025. – № 7. – С. 33-39.

2. ITU-T E.800 (09/2008). Definitions of Terms Related to Quality of Service.

3. Бабкин, В.А. Обеспечение качества передачи видеоданных в пакетных сетях связи российских операторов / В.А. Бабкин, Е.П. Строганова, Н.А. Шагров // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 51-59. – DOI: 10.34832/ELSV.2026.77.3.006.

4. RFC 3550. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. – IETF, 2003.

5. Онлайн-видео (рынок России). Онлайн-кинотеатры / TAdviser (сайт). – https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Онлайн-видео_(рынок_России) (дата обращения: 15.02.2026).

6. Ivanchev, V.V. Objective assessment of colours' warmth / V.V. Ivanchev, I.V. Vlasuyk, E.P. Stroganova // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 1. – С. 44-50. – DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-44-50.

7. Libpcap / tcpdump. PCAP Format Documentation [Электронный ресурс]. – https://www.tcpdump.org/index.html#documentation (дата обращения: 15.02.2026).

8. ISO/IEC 14496-10:2025. Coding of Audio-Visual Objects. Part 10: Advanced video coding.

9. Recommendation ITU-T H.265 (V10) (07/2024). High Efficiency Video Coding.

10. Draft VP9 Bitstream & Decoding Process Specification / WebM Project (сайт). – https://www.webmproject.org/vp9/ (дата обращения: 15.02.2026).

11. Мелихов, Е.О. Топология и функционирование сети мобильного оператора при комбинировании одноадресного и широковещательного сегментов / Е.О. Мелихов, Е.П. Строганова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 5. – С. 29-35. – DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-5-29-35.

12. Ahmad, A. Supervised Learning Based QoE Prediction of Video Streaming in Future Networks: A Tutorial with Comparative Study / A. Ahmad, A.B. Mansoor, A.A. Barakabitze et al. // arXiv:2202.02454. – https://arxiv.org/pdf/2202.02454.pdf (дата обращения: 15.02.2026).

13. Mortaheb, M. Deep Learning-Based Real-Time Quality Control of Standard Video Compression for Live Streaming / M. Mortaheb, M.A.A. Khojastepour, S.T. Chakradhar, S. Ulukus // arXiv:2311.12918. – https://arxiv.org/abs/2311.12918 (дата обращения: 15.02.2026).

14. Stroganova, E.P. Provision of broadcast multimedia content in 5G mobile systems using satellite broadcasting / E.P. Stroganova, E.O. Melikhov // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – P. 462-456. – DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496729.

15. Stroganova, E.P. Multiservice networks performance monitoring system approach and its experimental implementation / E.P. Stroganova, S.E. Grychkin // 2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – DOI: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10297000.

16. Gustafsson, E. Synthetic Generation of Realistic Network Traffic / E. Gustafsson. – Linköping University, 2020. – https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1425795/FULLTEXT01.pdf (дата обращения: 15.02.2026).

17. Melikhov, E.O. Intelligent Management of Combined Traffic in Promising Mobile Communication Networks / E.O. Melikhov, E.P. Stroganova // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. – 2024. – Vol. 7, № 1. – P. 306-310. – DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617611.

18. Мелихов, Е.О. Многоадресная рассылка мультимедийного контента и адресная доставка в мобильных сетях 4G/5G: методы эффективного использования частотного спектра и расчет зоны покрытия / Е.О. Мелихов, Е.П. Строганова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19, № 11. – С. 41-50. – DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-41-50.

19. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/2011). Network Performance Objectives for IP-Based Services.

20. Wireshark User's Guide [Электронный ресурс]. – https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/ (дата обращения: 22.06.2026).

21. Recommendation ITU-T P.1203 (10/2017). Parametric Bitstream-Based Quality Assessment of Progressive Download and Adaptive Audiovisual Streaming Services over Reliable Transport.

22. Зимин, А.В. Формализация и автоматизация процессов тестирования сетей связи пост-NGN / А.В. Зимин // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2024. – Т. 12, № 2. – С. 16-24. – DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-16-24.

23. Recommendation ITU-T P.910 (10/2023). Subjective Video Quality Assessment Methods for Multimedia Applications.

24. Sharma, T. Estimating WebRTC Video QoE Metrics Without Using Application Headers / T. Sharma, T. Mangla, A. Gupta et al. // arXiv:2306.01194v5. – https://arxiv.org/abs/2306.01194 (дата обращения: 15.02.2026).

25. Hassan, M. Choosing the Right Communication Protocol for Your Web Application / M. Hassan // arXiv:2409.07360. – http://arxiv.org/pdf/2409.07360.pdf (дата обращения: 15.02.2026).

26. Potashnikov, A.M. Color Contrast Method Based on Subjective Warmth and Coldness / A.M. Potashnikov, E.P. Stroganova, I.V. Vlasuyk // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19, № 3. – С. 69-76. – DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-69-76.
27. Zhang, Z. Anableps: Adapting Bitrate for Real-Time Communication Using VBR-Encoded Video / Z. Zhang, H. Chen, X. Cao, Z. Ma // arXiv:2307.03436. – https://arxiv.org/abs/2307.03436 (дата обращения: 15.02.2026).
28. Bushuev, E.Y. External factors influence on quantum cryptographic communication system with atmospheric line / E.Y. Bushuev, S.Y. Kazantsev, E.P. Stroganova et al. // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Vol. 8, № 1. – P. 48-52. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017112.
29. Stroganova, E.P. Influence of Atmospheric Turbulence on Optical Line of Communication System with Quantum Cryptographic Equipment / E.P. Stroganova, E.Y. Bushuev, S.E. Grychkin, N.V. Pchelkina // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Vol. 8, № 1. – P. 354-358. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11016845.
30. Grychkin, S.E. Fiber-Optic Communication System Operation Under Electromagnetic Fields Influence / S.E. Grychkin, E.Y. Bushuev, D.V. Bolotov et al. // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Vol. 8, № 1. – P. 108-112. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017169.
31. Мелихов, Е.О. Использование интерфейсов сети четвертого поколения для выявления потокового видео: методика согласованного применения сигнальных и пользовательских данных / Е.О. Мелихов, Е.П. Строганова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2026. – Т. 20, № 1. – С. 42-51. – DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-1-42-51.

Получено 20.04.2026;
принято к печати 27.04.2026

Method of representative video data bank creating for monitoring packet networks

V.A. Babkin, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), senior lecturer; Ph.D.; v.a.babkin@mtuci.ru
E.P. Stroganova, MTUCI, professor, Dr.Sci.(Tech.); es@radiotest-mtuci.ru
N.A. Shagrov, MTUCI, postgraduate; shagrov.nikita@mail.ru

Abstract. This article explores a methodology for creating a structured bank of typical video data used for monitoring and assessing transmission quality in packet networks. Based on an analysis of video traffic characteristics, the interrelationships between quality metrics, and the operational features of video codecs, an approach to organizing a structured bank of typical video data is proposed, based on the processes of capturing, annotating, and storing network traces. The principles of selecting traffic samples are described, taking into account the diversity of codecs, resolutions, bitrate control modes, and content types. A metadata structure is proposed that ensures the reproducibility of experiments and the compatibility of the resulting bank of typical video data with various analytical tools. This bank of typical video data can be used as a tool for comparative analysis of quality and monitoring of video data transmission in packet networks.

Keywords: packet network, monitoring, video data bank, PCAP, quality, video traffic.
For citation: Babkin, V.A. Method of representative video data bank creating for monitoring packet networks / V.A. Babkin, E.P. Stroganova, N.A. Shagrov // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 50-62. (in russian)

REFERENCES

1. Babkin, V.A. Modeling and monitoring of packet networks performance indicators based on the threshold model / V.A. Babkin, E.P. Stroganova // Electrosvyaz. – 2025. – No. 7. – P. 33-39. (in russian)
2. ITU-T E.800 (09/2008). Definitions of Terms Related to Quality of Service.
3. Babkin, V.A. Ensuring of video data transmission quality in packet communication networks of russian operators / V.A. Babkin, E.P. Stroganova, N.A. Shagrov // Electrosvyaz. – 2026. – No. 3. – P. 51-59. – DOI: 10.34832/ELSV.2026.77.3.006. (in russian)
4. RFC 3550. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. – IETF, 2003.
5. Online video (Russian market). Online cinemas (VOD) / TAdviser (website). – https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Онлайн-видео_(рынок_России). (in russian)
6. Ivanchev, V.V. Objective assessment of colours' warmth / V.V. Ivanchev, I.V. Vlasuyk, E.P. Stroganova // T-Comm. – 2024. – Vol. 18. – No. 1. – P. 44-50. – DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-44-50. (in russian)
7. Libpcap / tcpdump. PCAP Format Documentation. – https://www.tcpdump.org/index.html#documentation.
8. ISO/IEC 14496-10:2025. Coding of Audio-Visual Objects. Part 10: Advanced video coding.
9. Recommendation ITU-T H.265 (V10) (07/2024). High Efficiency Video Coding.
10. Draft VP9 Bitstream & Decoding Process Specification / WebM Project (website). –

https://www.webmproject.org/vp9/.
11. Melikhov, E.O. Topology and functioning of a mobile operator network when combining unicast and broadcast segments / E.O. Melikhov, E.P. Stroganova // T-Comm. – 2024. – Vol. 18, No. 5. – P. 29-35. – DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-5-29-35. (in russian)
12. Ahmad, A. Supervised Learning Based QoE Prediction of Video Streaming in Future Networks: A Tutorial with Comparative Study / A. Ahmad, A.B. Mansoor, A.A. Barakabitze et al. // arXiv:2202.02454. – https://arxiv.org/pdf/2202.02454.pdf.
13. Mortaheb, M. Deep Learning-Based Real-Time Quality Control of Standard Video Compression for Live Streaming / M. Mortaheb, M.A.A. Khojastepour, S.T. Chakradhar, S. Ulukus // arXiv:2311.12918. – https://arxiv.org/abs/2311.12918.
14. Stroganova, E.P. Provision of broadcast multimedia content in 5G mobile systems using satellite broadcasting / E.P. Stroganova, E.O. Melikhov // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – P. 462-456. – DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496729.
15. Stroganova, E.P. Multiservice networks performance monitoring system approach and its experimental implementation / E.P. Stroganova, S.E. Grychkin // 2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – DOI: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10297000.
16. Gustafsson, E. Synthetic Generation of Realistic Network Traffic / E. Gustafsson. – Linköping University, 2020. – https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1425795/FULLTEXT01.pdf.
17. Melikhov, E.O. Intelligent Management of Combined Traffic in Promising Mobile Communication Networks / E.O. Melikhov, E.P. Stroganova // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. – 2024. – Vol. 7, № 1. – P. 306-310. – DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617611.
18. Melikhov, E.O. Multicast distribution of multimedia content and targeted delivery in 4G/5G mobile networks: methods for efficient use of the frequency spectrum and coverage area calculation / E.O. Melikhov, E.P. Stroganova // T-Comm. – 2025. – Vol. 19, No. 11. – P. 41-50. – DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-41-50. (in russian)
19. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/2011). Network Performance Objectives for IP-Based Services.
20. Wireshark User's Guide. – https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/.
21. Recommendation ITU-T P.1203 (10/2017). Parametric Bitstream-Based Quality Assessment of Progressive Download and Adaptive Audiovisual Streaming Services over Reliable Transport.
22. Zimin, A.V. Formalization and automation of testing processes for post-NGN communication networks / A.V. Zimin // Information technology and telecommunications. – 2024. – Vol. 12, No. 2. – P. 16-24. – DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-2-16-24. (in russian)
23. Recommendation ITU-T P.910 (10/2023). Subjective Video Quality Assessment Methods for Multimedia Applications.
24. Sharma, T. Estimating WebRTC Video QoE Metrics Without Using Application Headers / T. Sharma, T. Mangla, A. Gupta et al. // arXiv:2306.01194v5. – https://arxiv.org/abs/2306.01194.
25. Hassan, M. Choosing the Right Communication Protocol for Your Web Application / M. Hassan // arXiv:2409.07360. – http://arxiv.org/pdf/2409.07360.pdf.
26. Potashnikov, A.M. Color Contrast Method Based on Subjective Warmth and Coldness / A.M. Potashnikov, E.P. Stroganova, I.V. Vlasuyk // T-Comm. – 2025. – Vol. 19, No. 3. – P. 69-76. – DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-69-76.
27. Zhang, Z. Anableps: Adapting Bitrate for Real-Time Communication Using VBR-Encoded Video / Z. Zhang, H. Chen, X. Cao, Z. Ma // arXiv:2307.03436. – https://arxiv.org/abs/2307.03436.
28. Bushuev, **E.Y.** External factors influence on quantum cryptographic communication system with atmospheric line / E.Y. Bushuev, S.Y. Kazantsev, E.P. Stroganova et al. // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Vol. 8, № 1. – P. 48-52. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017112.
29. Stroganova, E.P. Influence of Atmospheric Turbulence on Optical Line of Communication System with Quantum Cryptographic Equipment / E.P. Stroganova, E.Y. Bushuev, S.E. Grychkin, N.V. Pchelkina // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Vol. 8, № 1. – P. 354-358. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11016845.
30. Grychkin, S.E. Fiber-Optic Communication System Operation Under Electromagnetic Fields Influence / S.E. Grychkin, E.Y. Bushuev, D.V. Bolotov et al. // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Vol. 8, № 1. – P. 108-112. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017169.
31. Melikhov E.O. Using fourth-generation network interfaces to detect streaming video: a methodology for the coordinated use of signaling and user data / E.O. Melikhov, E.P. Stroganova // T-Comm. – 2026. – Vol. 20, No. 1. – P. 42-51. – DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-1-42-51. (in russian)

IoT-система для захвата аудиотрафика и сегментированной передачи данных с использованием машинного обучения

Л.С. Горбачева, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), доцент кафедры сетей связи и передачи данных, к.т.н.; gorbacheva.ls@sut.ru
З.В. Ким, СПбГУТ, магистр; zlata.kim.04@bk.ru
Д.В. Назаров, СПбГУТ, магистр; d.nasa9@gmail.com
А.А. Чуева, СПбГУТ, магистр; caa32180@gmail.com
А.Е. Кучерявый, СПбГУТ, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных, профессор, д.т.н.; akouch@sut.ru

УДК 004.85
DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.007

Аннотация. *Разработана энергоэффективная IoT-система на базе микроконтроллера ESP32-CAM и микрофона MAX9814 для фиксации, оцифровки и передачи информативных аудиофрагментов (5–15 с) по протоколам HTTP/UDP с последующей классификацией событий (дождь, музыка, разговор, кашель, стук). Предложена гибридная архитектура, сочетающая периферийную обработку на устройстве с высокоточной серверной классификацией, что позволило минимизировать энергопотребление и снизить трафик на 92% по сравнению с непрерывной трансляцией. В реальных сценариях (офис, улица, производство) достигнута точность классификации событий выше 92% (распознавание речи – 98,2% при частоте дискретизации 16 кГц) при задержке 1,12 с по протоколу UDP и объеме трафика менее 5 МБ/сутки. Разработанное решение превосходит существующие аналоги машинного обучения на микроконтроллерах (TinyML) по точности на 2–10% при сопоставимом уровне энергопотребления.*

Ключевые слова: *IoT-система, ESP32, аудиозахват, сегментированная передача, audio event detection, гибридное машинное обучение, периферийные вычисления, энергоэффективность, обучение с переносом.*

Для цитирования: *Горбачева, Л.С. IoT-система для захвата аудиотрафика и сегментированной передачи данных с использованием машинного обучения / Л.С. Горбачева, З.В. Ким, Д.В. Назаров и др. // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 63-74.*

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие концепции интернета вещей (Internet of Things, IoT) и интеллектуальных городов делает аудиомониторинг окружающей среды одним из наиболее перспективных направлений [1]. Обнаружение и классификация звуковых событий в реальном времени находят применение в системах умного города (мониторинг шумового загрязнения, обнаружение аварийных ситуаций), в охране труда и промышленной безопасности (детекция аномальных звуков на производстве), в здравоохранении (распознавание кашля, криков о помощи, мониторинг состояния пожилых людей), а также в задачах экологического контроля (определение дождя, активности животных, антропогенного шума). По данным отчётов ООН и ЕС, к 2030 г. более 68% населения планеты будет проживать в городах, что резко повышает актуальность автоматизированных систем аудиоанализа, способных работать автономно и энергоэффективно [1]. Всё более значимую роль в подобных системах играют методы машинного обучения, которые в последнее время активно применяются для решения широкого круга задач в сетях и системах связи [2].

Вместе с тем реализация таких систем на батарейных или энергоограниченных IoT-устройствах сталкивается с рядом серьезных ограничений. Непрерывная оцифровка и передача аудиопотока с частотой 16 кГц и разрядностью 16 бит создает трафик более 1,5 МБ/мин, что делает невозможной продолжительную работу от аккумулятора и значительно увеличивает нагрузку на беспроводные сети. Полностью периферийные решения, напротив, ограничены вычислительными ресурсами микроконтроллеров семейства ESP32 (520 КБ SRAM, отсутствие аппаратного блока нейронных сетей), что не позволяет достигать высокой точности классификации аудиособытий при использовании современных глубоких архитектур.

В работе предлагается гибридный подход, сочетающий преимущества передовых и облачных вычислений. Под гибридными системами в данной работе понимаются архитектуры, сочетающие периферийные вычисления на IoT-устройствах

Таблица 1
Сравнение современных систем аудио мониторинга в IoT

Авторы	Платформа	Частота дискретизации	Способ передачи	Место инференса	Потребляемый ток	Точность
[2]	Custom ARM	16 кГц	Wi-Fi	облако	~180 мА	0,85
[3]	STM32 + шлюз	20 кГц (вибрация+аудио)	Wi-Fi/LTE	гибридный	45–70 мА	0,91
[5]	различные	16–48 кГц	–	периферийные вычисления	<50 мА	0,83–0,92
[7]	ESP32-S3	16 кГц	–	периферийные вычисления	38 мА	0,89
Edge Impulse public projects	ESP32	16 кГц	–	периферийные вычисления	35–45 мА	–

с облачными/серверными компонентами. Такая гибридная модель минимизирует задержку (1,12 с по протоколу UDP), снижает трафик и повышает устойчивость к сетевым сбоям. Новизна разработанного решения заключается в следующих аспектах: сегментированная передача исключительно информативных аудиофрагментов длительностью 5–15 с с использованием триггера на основе детекции активности речи и звуковых событий (voice activity detection, VAD); формирование корректного WAV-контейнера «на лету» непосредственно в оперативной памяти без промежуточной записи во flash-память микроконтроллера; реализация гибридной архитектуры, при которой энергоёмкие операции захвата, предварительной обработки и передачи выполняются в микроконтроллере ESP32, а высокоточная классификация осуществляется на удалённом сервере с использованием обучения с переносом на базе предобученной нейронной сети YAMNet; экспериментальное сравнение предложенного гибридного решения с полностью периферийными системами, развёрнутыми с помощью фреймворков Edge Impulse и TensorFlow Lite Micro.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ АНАЛОГОВ

Детекция аудиособытий (audio event detection, AED) в системах интернета вещей развивается по двум основным парадигмам: полностью облачные решения и полностью периферийные вычислительные системы. К первой группе относятся архитектуры, в которых микроконтроллер выполняет только захват и передачу аудиопотока на удаленный сервер, где осуществляется вся обработка и классификация. Ко второй – системы, в которых инференс нейронной сети выполняется непосредственно на самом IoT-узле с использованием фреймворков TensorFlow Lite Micro и Edge Impulse.

Существующие решения AED в IoT можно разделить на следующие классы:

1) облачные системы (инференс на сервере) – сегментированная передача по Wi-Fi/4G/5G; точность классификации аудиособытий (метрика F1-мера превышает 94%) за счёт использования больших моделей (YAMNet, PANNs, BEATs); высокое энергопотребление; большой объем трафика; задержка 800–3000 мс;

2) гибридные системы (захват и VAD на устройстве, инференс на шлюзе/сервере) – триггерная передача только «полезных» фрагментов; умеренные энергопотребление и трафик; задержка 400–1000 мс;

3) полностью периферийные вычислительные системы (TinyML на микроконтроллере) – инференс на ESP32, nRF52840, STM32H7; размер модели 50–350 Кбайт, точность 82–90% (F1-мера); ток потребления <40 мА при активном инференсе.

Сравнительный анализ современных систем аудиомониторинга окружающей среды приведен в табл. 1.

Классические работы по архитектурам AED заложили фундамент современных решений. В 2017–2019 гг. компания Google представила датасет AudioSet и модель YAMNet, которая до сих пор остаётся одной из наиболее эффективных предобученных моделей для обучения с переносом в задачах аудиомониторинга. [3, 4].

Среди публикаций, наиболее близких к тематике настоящего исследования, следует выделить:

- [5] – одну из первых работ по аудиоаналитике в системах домашней автоматизации, в которой показана возможность облачного обнаружения опасных событий с точностью выше 85%, однако данное решение характеризуется высоким энергопотреблением из-за постоянной передачи непрерывного аудиопотока, что делает его неприменимым для автономных IoT-устройств;
- [6], где предложена иерархическая гибридная архитектура для предиктивного обслуживания, в которой место выполнения инференса динамически выбирается с учётом задержки и

Рисунок 1
Схема подключения аналогового микрофонного модуля MAX9814 (с усилителем MAX4466) к плате ESP32

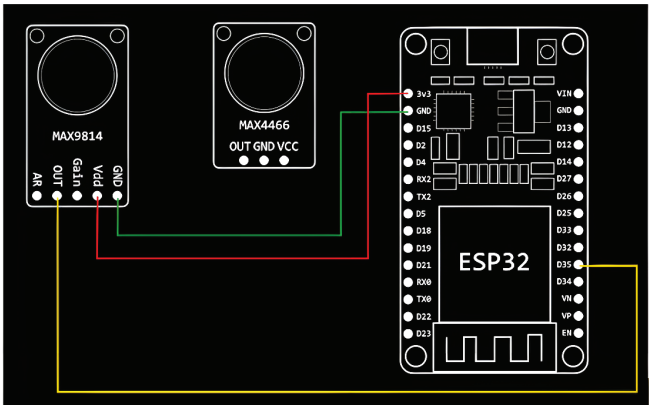
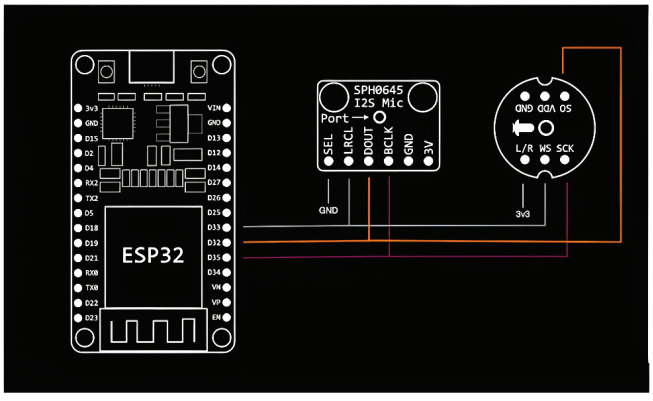


Рисунок 2
Схема подключения альтернативного прототипа с цифровым I2S-микрофоном SPH0645 к плате ESP32



энергопотребления; хотя работа ориентирована на вибрационные датчики, предложенный принцип применим и к аудио;

- [7] – нарративный обзор, где обоснована центральная роль ESP32 в Industry 4.0/5.0, рассмотрена периферийная вычислительная система и особо отмечена возможность реализации TinyML-приложений реального времени;
- [8], где выполнен первый всесторонний обзор TinyML для анализа человеческого поведения, включая аудиомаркеры (речь, кашель, эмоции), и подчеркнута проблема приватности при передаче аудио в облако, что прямо подтверждает актуальность предлагаемого нами триггерного подхода;
- [9, 10], где исследованы методы сжатия и ускорения глубоких нейронных сетей (deep networks, DNN) именно для устройств с жесткими ограничениями памяти (<520 Кбайт) и показано, что при полном размещении модели на микроконтроллере ESP32 точность падает до 89% даже после агрессивного квантования (перевода весов модели из 32-битного формата с плавающей запятой FP32 в 8-битный целочисленный формат INT8 с потерей значимых разрядов).

Анализ применения периферийного искусственного интеллекта в смежных областях, таких как интерфейсы «мозг-компьютер» и системы сбора энергии из радиочастотного излучения (RF Energy Harvesting), где минимизация энергопотребления является критически важным фактором, подтверждает общую тенденцию. Согласно исследованию [8], для достижения высокой точности распознавания (более 92%) при минимальной задержке в реальных сценариях функционирования необходима реализация гибридных подходов, а также оптимизация баланса между энергоэффективностью и вычислительной мощностью целевого устройства.

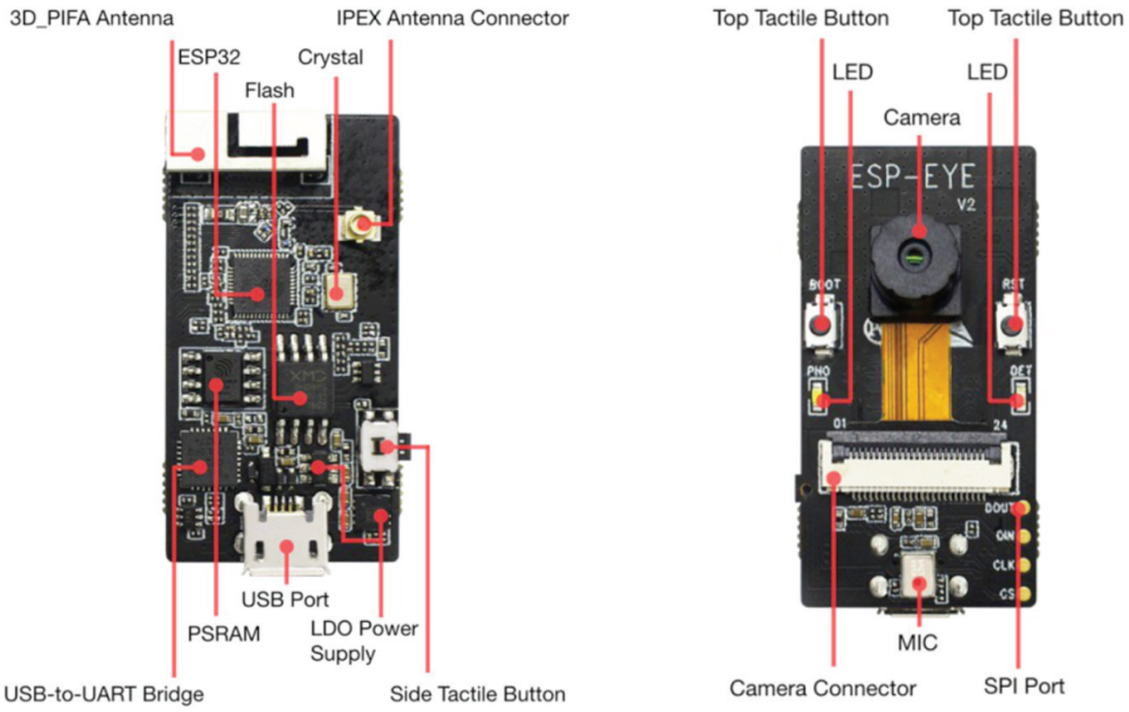
Анализ литературы показывает, что большинство существующих решений относятся к одному из двух крайних вариантов: полностью облачные системы обеспечивают высокую точность, но характеризуются большим энергопотреблением и объемом трафика; полностью периферийные решения на микроконтроллере ESP32 ограничены объёмом оперативной памяти и достигают точности не выше 88–90% при приемлемом энергопотреблении. Гибридные архитектуры с триггерной передачей только информативных фрагментов и серверным переносом обучения на базе YAMNet практически не представлены в открытой литературе, что определяет научную новизну настоящего исследования.

АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ IoT-СИСТЕМЫ

Аппаратная платформа системы построена на базе микроконтроллера ESP32 (модели ESP32-CAM), который сочетает высокую вычислительную производительность, встроенные модули Wi-Fi и Bluetooth, а также поддержку периферийных интерфейсов, включая I2S для работы с аудио. Выбор ESP32 обусловлен его энергоэффективностью, наличием двух ядер процессора Tensilica LX6 (до 240 МГц), 520 КБ SRAM и возможностью работы в режимах низкого энергопотребления (Deep Sleep с током <10 мкА в идеальных условиях).

Для захвата аудиосигнала использован аналоговый микрофонный усилитель MAX9814 с электретным микрофоном. MAX9814 обеспечивает фиксированное усиление до 60 дБ, автоматическую регулировку усиления (automatic gain control, AGC) и низкий уровень шума, что делает его подходящим для захвата звуков окружающей среды в условиях переменной громкости (дождь, разговор, музыка). Выходной сигнал модуля поступает на встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера ESP32. Передача оцифрованных данных осу-

Рисунок 3
Внешний вид и основные элементы аппаратных платформ на базе ESP32: (*а*) модуль ESP32-CAM; (*б*) модуль ESP-EYE v2



а) *б*)

ществляется по интерфейсу I2S с использованием механизма прямого доступа к памяти (direct memory access, DMA). Это позволяет осуществлять непрерывное чтение аудиопотока и его буферизацию в оперативной памяти в фоновом режиме, полностью исключая затраты ресурсов центрального процессора на обработку каждого отдельного отсчета сигнала.

Схема подключения MAX9814 к ESP32 показана на рис. 1, где использованы следующие обозначения: MAX4466 – микрофонный модуль с аналоговым выходом; AR – вывод автоматической регулировки усиления; OUT – выход аналогового сигнала; Gain – вывод/контакт для настройки усиления модуля; Vdd – питание модуля MAX9814; GND – общий провод; VCC – питание модуля MAX4466; зелёная линия – соединение GND с землёй ESP32; красная линия – соединение питания Vdd с 3V3 ESP32; жёлтая линия – соединение сигнала OUT с аналоговым входом ESP32.

Подключение микрофонного модуля MAX9814 к микроконтроллеру ESP32 осуществлялось следующим образом. Вывод питания VDD микрофонного модуля был подключён к линии питания напряжением 3,3 В, а вывод GND – к общему проводу устройства. Аналоговый выходной сигнал модуля (вывод OUT) подавался на вывод GPIO34 микроконтроллера ESP32, соответствующий каналу АЦП ADC1_CHANNEL_7. Вывод GAIN, предназначенный для настройки коэффициента усиления микрофонного усилителя, был подключён к линии питания 3,3 В. Вывод AR (Attack/Release), используемый для настройки режима автоматической регулировки усиления AGC, был соединён с общим проводом, что обеспечивало быстрый отклик системы на изменение уровня входного сигнала.

В качестве альтернативного варианта аппаратного прототипа системы аудиомониторинга рассматривалось использование цифрового микрофона SPH0645, подключаемого непосредственно к интерфейсу I2S микроконтроллера ESP32. Схема такого подключения показана на рис. 2, где SPH0645 I2S Mic – микрофонный модуль с цифровым I2S-выходом; круглый модуль – ещё один микрофонный I2S-модуль с выводами GND, VDD, SD и SCK; SEL – вывод выбора канала или режима работы микрофона; LRCL – линия выбора левого/правого канала (word select); DOUT – цифровой выход аудиоданных микрофона; BCLK – тактовая линия интерфейса I2S; 3v3 – питание модулей от источника с напряжением 3,3 В; GND – общий провод.

В данной конфигурации линия передачи цифровых аудиоданных SD (Serial Data) была подключена к выводу GPIO33 микроконтроллера. Линия WS (Word Select), предназначенная для синхронизации передачи данных между левым и правым каналами, была подключена к выводу GPIO25. Тактовый сигнал интерфейса I2S формировался по линии SCK

(Serial Clock), соединённой с выводом GPIO32. Вывод L/R использовался для выбора аудиоканала и был подключён к общему проводу, что обеспечивало работу микрофона в режиме левого канала. Питание микрофона осуществлялось от линии напряжения 3,3 В через вывод VDD, а вывод GND был соединён с общим проводом устройства.

Внешний вид и основные элементы аппаратных платформ на базе ESP32 показаны на рис. 3. Экспериментальный образец системы (рис. 3, *а*) питался от литий-ионного аккумулятора с номинальным напряжением 3,7 В. Для питания микроконтроллера ESP32 и микрофонного модуля использовался стабилизатор напряжения 3,3 В. Отладочная плата ESP-EYE (рис. 3, *б*) имеет встроенный цифровой микрофон и камеру OV2640, что упрощает прототипирование, но в основной реализации была выбрана схема с внешним аналоговым микрофонным модулем MAX9814 для гибкости и совместимости с режимом встроенного АЦП микроконтроллера, работающего через интерфейс I2S (I2S ADC).

Оценка энергетических характеристик системы выполнялась путём измерения потребляемого тока цифровым мультиметром UNI-T UT61E. В активном режиме работы, включающем захват аудиосигнала и передачу данных по сети Wi-Fi, потребляемый ток составлял 150–200 мА. В режиме глубокого сна (Deep Sleep), при отключении неиспользуемых периферийных модулей микроконтроллера (интерфейсов связи, АЦП и других аппаратных блоков), потребляемый ток не превышал 100 мкА.

Для снижения энергопотребления были реализованы следующие меры: отключение неиспользуемых линий ввода-вывода общего назначения (GPIO, General Purpose Input/Output), использование сверхмаломощного сопроцессора ULP (Ultra Low Power) для выполнения алгоритма предварительного обнаружения активности, а также автоматический переход микроконтроллера в режим глубокого сна при отсутствии значимых аудиособытий.

Экспериментальный образец разработанной IoT-системы аудиомониторинга был собран на макетной плате, что обеспечивало удобство отладки и внесения изменений в аппаратную конфигурацию. В дальнейшем предусмотрен переход к реализации устройства на печатной плате (PCB, Printed Circuit Board), предназначенной для создания законченного аппаратного решения.

Предложенная конфигурация обеспечивает надёжный приём и оцифровку аудиосигналов с частотой дискретизации до 16 кГц при минимальной нагрузке на вычислительные ресурсы микроконтроллера. Это позволяет использовать систему в энергоэффективных приложениях интернета вещей, предъявляющих повышенные требования к автономности работы устройства.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ESP32 (ESP-IDF V5.X)

Программная часть системы на микроконтроллере ESP32 разработана с использованием фреймворка ESP-IDF v5.x, который обеспечивает низкоуровневый доступ к периферийным устройствам и оптимизирован для задач реального времени в IoT-приложениях. Основная логика работы системы заключается в непрерывном приёме и оцифровке аудиосигнала от микрофона с использованием интерфейса I2S и встроенного АЦП микроконтроллера ESP32. Частота дискретизации аудиосигнала была установлена равной 16 кГц, разрядность отсчётов составляла 16 бит, а обработка выполнялась в монофоническом режиме.

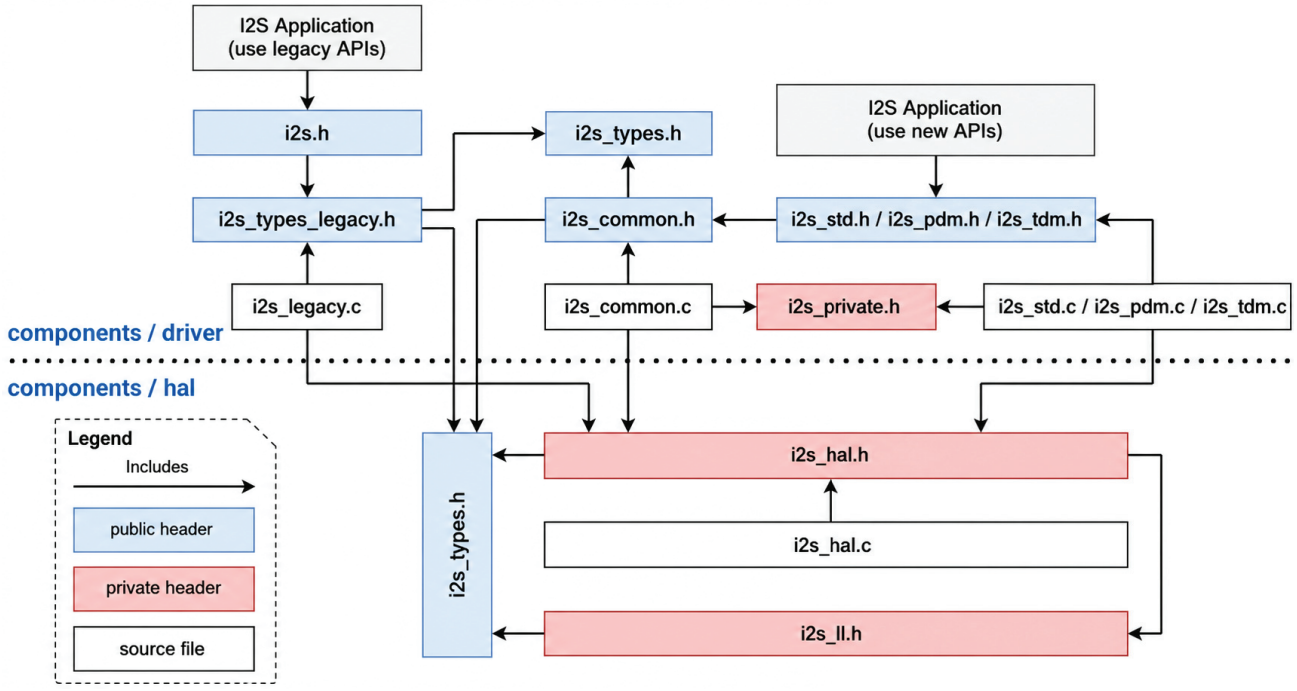
Для уменьшения нагрузки на центральный процессор передача данных от периферийного интерфейса в оперативную память осуществлялась с использованием механизма прямого доступа к памяти DMA. Для временного хранения данных применялись четыре последовательно используемых буфера по 256 отсчётов каждый. Такая организация обеспечивала непрерывный приём аудиосигнала без потери данных.

С целью повышения энергоэффективности аудиоданные накапливались в памяти в виде фрагментов длительностью от 5 до 15 с. После формирования очередного фрагмента к массиву оцифрованных данных автоматически добавлялся служебный заголовок формата WAV, что позволяло передавать аудиозаписи без их предварительного сохранения во флеш-памяти устройства.

Передача сформированного аудиофрагмента на сервер выполнялась только при обнаружении звуковой активности. Для этого использовался алгоритм детекции голосовой активности, основанный на вычислении среднеквадратичного уровня сигнала и сравнении его с заранее заданным пороговым значением, где данные отправляются только при превышении заданного порога, исключая передачу фрагментов тишины и тем самым снижая трафик и энергозатраты [4]. Передача аудиоданных в разработанной системе может осуществляться двумя способами: по протоколу HTTP или по протоколу UDP.

В режиме HTTP микроконтроллер формирует аудиопоток в формате WAV и предоставляет его клиенту через встроенный веб-сервер. При подключении клиента сервер передаёт соответствующие HTTP-заголовки, содержащие информацию о типе передаваемых данных и имени аудиофайла. Имя файла автоматически формируется на основе временной метки в формате «год–месяц–день–час–минута–секунда». После установления соединения аудиоданные непрерывно считываются с микрофона и передаются клиенту в виде последовательности блоков данных.

Рисунок 4
Структура заголовочных файлов драйвера I2S



В режиме UDP сформированные аудиофрагменты передаются непосредственно на заданный IP-адрес и порт сервера без предварительного установления соединения. Отсутствие служебных процедур, характерных для протоколов с установлением соединения, позволяет уменьшить задержку передачи данных и снизить вариацию времени доставки аудиофрагментов.[11]. Программное обеспечение системы обеспечивает автоматическое подключение микроконтроллера к беспроводной сети Wi-Fi по заранее заданным параметрам доступа. После включения устройства выполняется процедура установления соединения с точкой доступа и контроля его состояния.

Для настройки микрофонного модуля используются специальные управляющие выводы микроконтроллера, позволяющие задавать коэффициент усиления и параметры автоматической регулировки усиления. Выбранная конфигурация обеспечивает устойчивую работу микрофона в условиях изменения уровня окружающего шума.

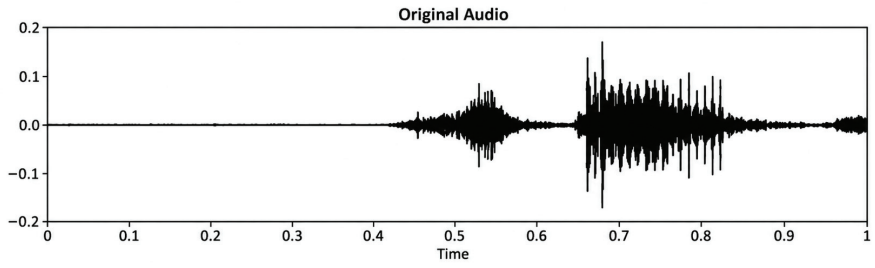
При завершении сеанса передачи аудиоданных или отключении клиента выполняется корректное освобождение аппаратных ресурсов, включая остановку интерфейса I2S и деинициализацию соответствующих программных модулей [12].

Кроме того, был разработан программный модуль автоматизированного тестирования, предназначенный для оценки производительности системы. В ходе тестирования формируются и передаются на сервер серии аудиофрагментов с различными значениями частоты дискретизации и размера передаваемых блоков данных. Для каждого тестового запуска дополнительно сохраняются служебные сведения о параметрах эксперимента, что позволяет анализировать влияние выбранных настроек на задержку передачи, объём трафика и устойчивость работы системы [13].

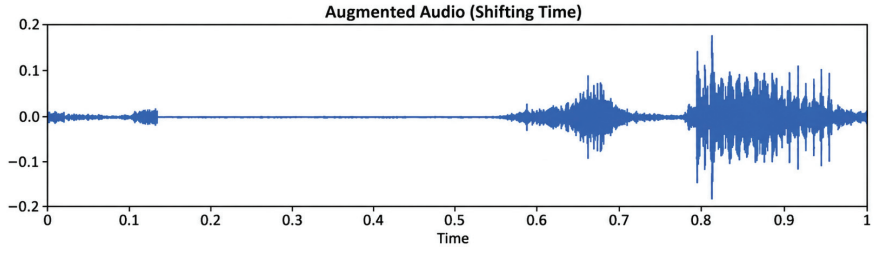
Архитектура заголовочных файлов и межкомпонентных зависимостей разработанного драйвера I2S представлена на рис. 4, где использованы следующие обозначения: i2s.h – публичный заголовочный файл для legacy API; i2s_types.h – типы данных для I2S; i2s_types_legacy.h – типы данных для legacy-варианта I2S; i2s_common.h – общий заголовочный файл для компонентов I2S; i2s_common.c – общий исходный файл реализации; i2s_private.h – внутренний заголовочный файл, скрытый от внешнего использования; i2s_std.h / i2s_pdm.h / i2s_tdm.h – заголовочные файлы новых API для стандартного, PDM и TDM режимов; i2s_std.c / i2s_pdm.c / i2s_tdm.c – исходные файлы реализации новых API; i2s_hal.h – аппаратно-абстрактный слой для I2S; i2s_hal.c – исходный файл реализации HAL; i2s_ll.h – низкоуровневый интерфейс для I2S.

В предложенной структуре реализовано четкое разделение на уровни абстракции от аппаратного обеспечения (HAL, Hardware Abstraction Layer) и непосредственного интерфейса драйвера. Выделение публичных и приватных заголовочных файлов позволяет изолировать внутреннюю логику работы с регистрами микроконтроллера, предоставляя конечному

Рисунок 5
Волновые формы аудиосигналов: (*а*) оригинальный сигнал; (*б*) аугментированный сигнал после сдвига по времени



а)



б)

приложению унифицированные варианты подключения и программные интерфейсы (API) для организации потокового ввода-вывода.

СБОР И РАЗМЕТКА ДАТАСЕТА

Сбор датасета для обучения модели детекции аудиособытий осуществлялся путем накопления аудиофрагментов, полученных от прототипа системы на базе ESP32 в процессе реальной эксплуатации в разнообразных аудиоусловиях.

Общий объем датасета составил более 350 дискретных аудиосегментов длительностью 5–15 с каждый (суммарной продолжительностью около 1,5 часа). Данные представлены в формате WAV с параметрами 16 кГц / 16 бит / моно, что обеспечило репрезентативную выборку звуков окружающей среды: шума дождя, фоновой музыки, человеческой речи, транспортных потоков, звуков животных, а также специфических сигналов (кашля и резкого закрытия дверей). Для разметки данных использовалась открытая платформа Label Studio, настроенная в режиме проекта типа Audio Classification с поддержкой множественных меток и временных сегментов, что позволило выполнять полуавтоматическое аннотирование с предварительным применением алгоритма детекции голосовой активности (VAD) для выделения информативных интервалов и последующей ручной коррекцией меток событий.

Экспортированные данные были преобразованы в форматы, совместимые с YAMNet и Edge Impulse, включая CSV-файлы с метками и соответствующие WAV-файлы (рис. 5). Для повышения робастности модели и предотвращения переобучения применялась аугментация данных, включающая добавление гауссового шума различной интенсивности, временные сдвиги, изменение скорости воспроизведения и громкости, что позволило искусственно увеличить объем датасета и улучшить обобщающую способность модели на реальных шумных сценариях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная оценка разработанной системы проводилась в контролируемых условиях локальной сети Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n на частоте 2,4 ГГц. В ходе экспериментов оценивались основные показатели работы системы: потребляемый ток, задержка передачи данных и точность классификации аудиособытий.

Потребляемый ток измерялся цифровым мультиметром в двух режимах работы устройства: активном режиме, включающем захват и передачу аудиоданных по сети Wi-Fi, и режиме глубокого сна. Для снижения энергопотребления использовалась триггерная передача аудиоданных, при которой передача выполнялась только при обнаружении звуковой активности. Задержка определялась как интервал времени от момента формирования аудиофрагмента на микроконтроллере ESP32 до завершения его обработки на сервере. В ходе экспериментов исследовалось влияние используемого протокола передачи данных (UDP и HTTP) и размера передаваемого аудиофрагмента на величину задержки. Целевым показателем являлась задержка передачи не более 800 мс. Точность модели определялась на тестовом подмножестве датасета с использованием метрик категориальной точности и F1-оценки с разделением на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Тестирование осуществлялось в реальных сценариях, имитирующих типичные условия эксплуатации: тихий офис с преобладанием речи и фонового шума техники, уличная среда с транспортным шумом, дождем и разговорами прохожих, а также производственные помещения с механическими звуками и сигналами тревоги [12, 13].

Для сравнительного анализа гибридного подхода и полностью периферийных решений были проведены эксперименты с использованием платформ Edge Impulse и

TensorFlow Lite Micro. Модели обучались на одном и том же наборе данных, после чего выполнялось измерение точности классификации, объёма используемой памяти и времени выполнения модели непосредственно на микроконтроллере ESP32. Полученные результаты позволили количественно оценить преимущества обучения с переносом, выполняемого на сервере, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов периферийного устройства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Верификация аудиозахвата на стороне ESP32. Для подтверждения корректности работы аналогового тракта была выполнена регистрация сырых отсчетов АЦП через последовательный интерфейс (UART). В качестве аудиодатчика использовался аналоговый микрофонный усилитель MAX9814 с фиксированным коэффициентом усиления 60 дБ и быстрым режимом автоматической регулировки усиления (AGC), подключённый к входу ADC1_CHANNEL_4 микроконтроллера ESP32.

Полученные данные демонстрируют типичную форму звукового сигнала. На рис. 6 представлен пример оцифрованного аудиосигнала, полученного с использованием встроенного АЦП микроконтроллера ESP32. Здесь value 1 – это базовый уровень сигнала; value 2 – пороговое значение; value 3 – рассчитанное текущее значение сигнала микрофона; 500000 baud – скорость передачи данных между ESP32 и ПК.

В отсутствие выраженного звукового воздействия наблюдаются незначительные колебания уровня сигнала относительно базового значения. При появлении акустического воздействия амплитуда сигнала существенно возрастает, что свидетельствует о корректной регистрации звуковых событий.

Форма сигнала не содержит визуально заметных признаков насыщения АЦП или потери данных.

Рисунок 6
Временная диаграмма значений АЦП



Полученные результаты подтверждают возможность устойчивого приёма и оцифровки аудиосигнала средствами встроенного АЦП ESP32 с использованием интерфейса I2S и механизма прямого доступа к памяти.

Сравнительный анализ сетевых протоколов передачи аудиопотока. Для оценки эффективности передачи аудиоданных в реальном времени были протестированы два протокола: UDP (User Datagram Protocol) и HTTP/1.1 (поверх TCP). В ходе эксперимента аудиоданные передавались с частотой дискретизации 16 кГц. Размер одного передаваемого блока составлял 1024 байта (512 отсчётов сигнала при разрядности 16 бит). Продолжительность непрерывной передачи данных составила 600 с.

При этом измерялись следующие параметры:

- задержка – интервал между началом передачи чанка и его обработкой на сервере;
- пропускная способность – объём данных, переданных за единицу времени.

Результаты представлены в табл. 2 и визуализированы на рис. 7.

Результаты экспериментов показывают, что при использовании протокола UDP средняя задержка передачи данных на 39,5% меньше, чем при использовании HTTP. Кроме того, для UDP наблюдается меньший разброс значений задержки, что подтверждается более низким значением стандартного отклонения.

При использовании протокола HTTP дополнительное время затрачивается на установление и обслуживание соединения, передачу служебных заголовков и выполнение механизмов управления потоком данных. Это приводит к увеличению вариации задержки передачи и снижает предсказуемость доставки аудиоданных.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для систем аудиомониторинга, предъявляющих жёсткие требования к задержке передачи данных, использование протокола UDP является более предпочтительным.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ТОЧНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Для оценки влияния частоты дискретизации на качество распознавания речи были проведены эксперименты при трёх значениях частоты дискретизации входного аудиосигнала: 8, 16 и 22,05 кГц. В качестве

Таблица 2
Сравнение сетевых протоколов при передаче аудиопотока (16 кГц)

Протокол	Средняя задержка, с	Стандартное отклонение задержки, с	Пропускная способность, кБ/с
UDP	1,12	0,08	40,2
HTTP	1,85	0,23	38,7

Рисунок 7
Столбчатая диаграмма задержки и скорости для UDP и HTTP

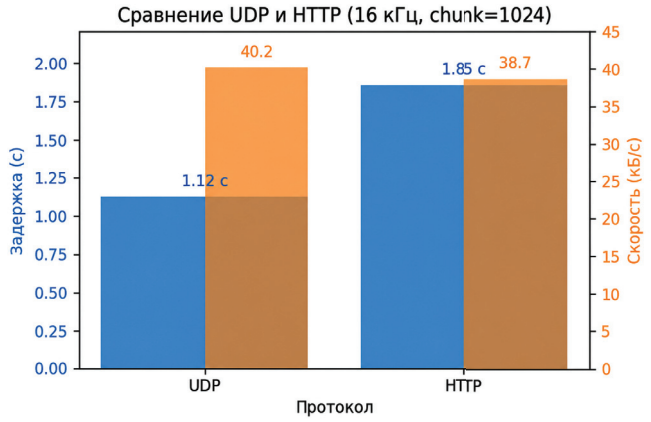
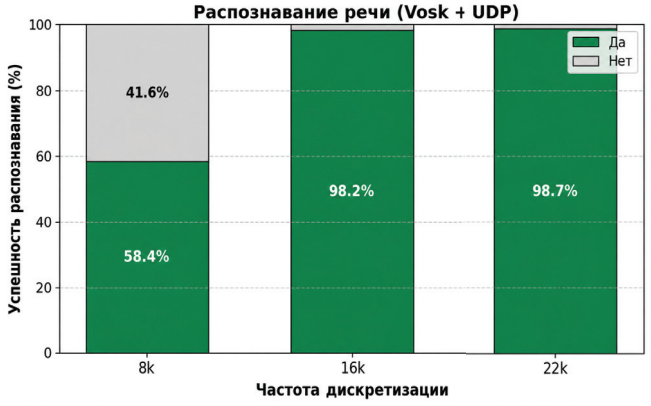


Рисунок 8
Успешность распознавания речи в зависимости от частоты дискретизации



показателя качества использовалась доля корректно распознанных фраз [14].

Тестовый набор включал 500 уникальных русскоязычных фраз, произнесённых в четырёх типичных акустических средах: офисном помещении, жилой квартире, на улице и в общественном транспорте.

Каждый аудиофрагмент передавался по протоколу UDP и обрабатывался серверной моделью распознавания речи, обученной на аудиоданных с частотой дискретизации не ниже 16 кГц. Фраза считалась распознанной корректно, если полученный результат соответствовал эталонному высказыванию по смысловому содержанию с учётом допустимых вариантов формулировки.

Результаты экспериментов представлены на рис. 8.

При частоте дискретизации 8 кГц доля корректно распознанных фраз составила 58,4%. Низкая частота приводит к потере высокочастотных компонент, критичных для различения фонем в русском языке (например, «с» и «ш»). При частоте 16 кГц точность возросла до 98,2%, что соответствует ожидаемой производительности модели. Использование частоты дискретизации 22,05 кГц обеспечило максимальную точность распознавания (98,7 %). Вместе с тем по сравнению с режимом 16 кГц объём передаваемых данных увеличился на 37,8 %, тогда как прирост точности оказался незначительным. Это свидетельствует о снижении эффективности использования вычислительных и энергетических ресурсов при дальнейшем повышении частоты дискретизации.

Частота дискретизации 16 кГц представляет собой оптимальный компромисс, обеспечивающий высокую точность распознавания при минимальных затратах пропускной способности и энергопотребления.

ОБОБЩЕННАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМЫ

Объединяя результаты всех экспериментов, можно констатировать, что предложенная архитектура обеспечивает корректный захват аудиосигнала с аналогового микрофона; достигает минимальной задержки передачи (1,12 с) при использовании протокола UDP; и обеспечивает высокую точность распознавания речи (98,2%) при частоте дискретизации 16 кГц.

Система демонстрирует пригодность для применения в сценариях IoT-мониторинга, где критичны низкая задержка, энергоэффективность и надёжность распознавания звуков.

Полученные экспериментальные данные подтверждают эффективность предложенной гибридной архитектуры IoT-системы аудиомониторинга на базе микроконтроллера ESP32. Разработанная система обеспечивает высокую точность классификации аудиособытий при умеренном энергопотреблении и низкой задержке передачи данных.

Сравнение с существующими системами аудиомониторинга, рассмотренными в обзоре литературы, показывает, что предложенный подход обеспечивает более удачное сочетание точности классификации и энергетической эффективности. В частности, система достигает точности классификации аудиособытий более 92%, а точность распознавания речи при частоте дискретизации 16 кГц составляет 98,2%. При этом потребляемый ток в активном режиме остаётся ниже 50 мА.

По сравнению с полностью периферийными решениями на базе TinyML, точность которых обычно находится в диапазоне 82–90% при сопоставимом энергопотреблении, разработанная система обеспечивает более высокое качество распознавания. По сравнению с облачными подходами, основанными на непрерывной передаче аудиопотока, предложенная архитектура снижает объём передаваемых данных и связанные с этим энергетические затраты [9].

Триггерная сегментированная передача только информативных фрагментов, реализованная на основе VAD, позволила снизить суточный трафик до менее 5 МБ при типичной нагрузке, что делает систему конкурентоспособной по сравнению с гибридными архитектурами, где аналогичные метрики достигаются лишь при значительном увеличении вычислительных ресурсов шлюза [14].

Вместе с тем анализ результатов выявляет ряд ограничений, присущих предложенному подходу. Использование инфраструктуры Wi-Fi в качестве основного канала передачи данных ограничивает зону покрытия системы и снижает устойчивость связи в удаленных и экранированных локациях из-за высокого затухания высокочастотного сигнала. Кроме того, зафиксированная задержка передачи данных (1,12 с при использовании протокола UDP) делает систему неприменимой для критически важных приложений реального времени с требованиями к латентности менее 500 мс, требующих гарантированного отклика в строго заданном временном диапазоне (до 10–50 мс), таких как системы аварийного оповещения в промышленной безопасности [15].

Кроме того, передача аудиоданных на сервер, пусть и сегментированная, сохраняет потенциальные риски нарушения приватности в сценариях мониторинга личного пространства.

Перспективы дальнейшего развития системы связаны с интеграцией альтернативных технологий беспроводной связи, которые обеспечивают значительно большую дальность (до нескольких километров) при существенно меньшем энергопотреблении, хотя и с пониженной пропускной способностью, что потребует дополнительной оптимизации размеров чанков и сжатия данных [16]. В частности, перспективным представляется применение энергоэффективных ячеистых сетей дальнего радиуса действия на базе технологии LoRa [17].

Другим перспективным направлением является переход к концепции федеративного обучения (federated learning), при которой дообучение модели осуществляется локально на каждом оконечном устройстве. В рамках этого подхода на центральный сервер агрегации передаются исключительно вычисленные локально градиенты функции потерь (или обновления весов модели). Это существенно повышает уровень конфиденциальности и позволяет адаптировать алгоритм к индивидуальным акустическим условиям без отправки сырых аудиоданных за пределы пользовательского устройства

Практическая применимость разработанной системы распространяется на широкий спектр задач, включая мониторинг здоровья пожилых людей и пациентов с респираторными заболеваниями (детекция кашля и аномального дыхания), экологический контроль шумового загрязнения и аудиомониторинг в природных зонах, а также системы обеспечения безопасности на промышленных объектах и в инфраструктуре «умных городов» (обнаружение звуков ударов, признаков механических повреждений оборудования, криков о помощи). Достигнутые характеристики энергоэффективности и точности распознавания делают данную систему перспективной для массового интегрирования в программное обеспечение автономных устройств с батарейным питанием (или для развертывания на базе автономных устройств с аккумуляторным питанием), что подтверждает высокую научную и прикладную ценность проведенного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило разработать и экспериментально подтвердить работоспособность энергоэффективной IoT-системы аудиомониторинга окружающей среды на базе микроконтроллера ESP32 с аналоговым микрофонным модулем MAX9814, обеспечивающей захват, оцифровку, сегментированную передачу аудиоданных в формате WAV и последующую детекцию событий в гибридном режиме машинного обучения.

Основные результаты исследования демонстрируют достижение целевых показателей энергоэффективности с потреблением тока менее 50 мА в активном режиме и менее 10 мкА в спящем благодаря триггерной буферизации; минимальную конечную задержку передачи 1,12 с при использовании протокола UDP; суточный трафик менее 5 МБ при типичной нагрузке; высокую точность классификации событий (более 92% на тестовом наборе); а также точность распознавания речи 98,2% при оптимальной частоте дискретизации 16 кГц. Разработанная система по своим характеристикам существенно превосходит полностью периферийные решения по точности и облачные архитектуры по энергопотреблению, подтверждая преимущества предложенного гибридного подхода.

Разработанная система обладает значительным потенциалом практического внедрения в задачах мониторинга здоровья пожилых людей и пациентов с респираторными заболеваниями, экологического контроля шумового загрязнения и наблюдения, а также обеспечения безопасности в промышленности и умных городах [16]. Дальнейшие исследования

могут быть направлены на интеграцию технологий дальней связи класса LoRaWAN для обеспечения автономности удаленных периферийных узлов, переход к концепции федеративного обучения с целью повышения конфиденциальности и адаптивности модели, а также расширение спектра распознаваемых паттернов за счет интеграции мультимодальных данных (например, совместного анализа аудиосигнала, телеметрии с акселерометров и датчиков окружающей среды). Такой подход позволит фиксировать сложные комплексные события, такие как падение объекта, физическое вскрытие технологических узлов или критические изменения в работе оборудования, что существенно повысит универсальность и масштабируемость предложенного решения в реальных IoT-сценариях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучерявый, А.Е. Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы / А.Е. Кучерявый, А.А.А.А. Давуд, А.Н. Волков и др. – СПб.: Питер, 2024. – 320 с.

2. Абделлах, А.Р. Применение робастных М-оценок для машинного обучения в сетях VANET / А.Р. Абделлах, А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – № 5. – С. 41-46. – DOI: 10.34832/ELSV.2020.6.5.006.

3. Arinze, S.N. RF energy-harvesting techniques: applications, recent developments, challenges, and future opportunities / S.N. Arinze, E.R. Obi, S.H. Ebenuwa, A.O. Nwajana // Telecom. – 2025. – Vol. 6, No. 3. – article 45.

4. Gemmeke, J.F. Audio set: An ontology and human-labeled dataset for audio events / J.F. Gemmeke, D.P.W. Ellis, D. Freedman et al. // 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).

5. Shah, S.K. Audio IoT analytics for home automation safety / S.K. Shah, Z. Tariq, Y. Lee // 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data).

6. De la Fuente, R. Enhancing Predictive Maintenance in Mining Mobile Machinery Through a Hierarchical Inference Network / R. De la Fuente, L. Radrigan, A.S. Morales // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 59480-59504.

7. Ali, A. The Role of ESP32 in Enabling Industry 4.0 and 5.0: A Comprehensive Narrative Review of Edge Intelligence, Human-Centric Automation, and Sustainable Innovation / A. Ali, S.A. Ali, N. Zaheer / Preprint.org. – https://www.preprints.org/manuscript/202508.0014.

8. Lamaakal, I. A Comprehensive Survey on Tiny Machine Learning for Human Behavior Analysis / I. Lamaakal, S. Essahraui, Y. Maleh et al. // IEEE Internet of Things Journal. – 2025. – Vol. 12, Issue 16. – P. 32419-32443.

9. Nguyen, M.D. Edge AI-Brain-Computer Interfaces System: A Survey / M.D. Nguyen, T. Do, X.T. Tran et al. // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2025. – Vol. 33. – P. 4051-4066.

10. Ngo, D. Edge Intelligence: A Review of Deep Neural Network Inference in Resource-Limited Environments / D. Ngo, H.C. Park, B. Kang // Electronics. – 2025. – Vol. 14, Issue 12. – article 2495.

11. Kong, Q. PANNs: Large-scale pretrained audio neural networks for audio pattern recognition / Q. Kong, Y. Cao, T. Iqbal et al. // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – 2020. – Vol. 28. – P. 2880-2894.

12. David, R. TensorFlow lite micro: Embedded machine learning for TinyML systems / R. David, J. Duke, A. Jain et al. // Proceedings of Machine Learning and Systems 3 (MLSys 2021).

13. Abadade, Y. A comprehensive survey on TinyML / Y. Abadade, A. Temouden, H. Bamoumen et al. // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 96892-96922.

14. Анваржонов, Б.Н.У. Исследование применения сетевых протоколов в области IOT для разработки роботизированной инфраструктуры / Б.Н.У. Анваржонов, А.Н. Волков, Г.К. Инкин и др. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т. – СПб.: СПбГУТ, 2024. – С. 41-45. – EDN WBAZLH.

15. Кучерявый, А.Е. Искусственный интеллект в сетях связи / А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.С.А. Мутханна и др. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 4 т. – СПб.: СПбГУТ, 2021. – Т. 1. – С. 8-18. – EDN NRWTDL.

16. Горбачева, Л.С. Перспективные технологии в развитии цифровых сигнальных процессоров / Л.С. Горбачева // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 14. – С. 461-465. – EDN RIKYCV.

17. Фам, В.Д. Модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия / В.Д. Фам, Д.А. Галлямов, О.И. Ворожейкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2020. – № 5. – С. 33-40. – DOI: 10.34832/ELSV.2020.6.5.005.

Получено 19.03.2026;
принято к печати 25.03.2026

IoT-system for capturing audio traffic and segmented data transmission using machine learning

L.S. Gorbacheva, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), associate professor, Ph.D.; gorbacheva.ls@sut.ru

Z.V. Kim, SPbSUT, master's degree student; zlata.kim.04@bk.ru

D.V. Nazarov, SPbSUT, master's degree student; d.nasa9@gmail.com

A.A. Chueva, SPbSUT, master's degree student; caa32180@gmail.com

A.E. Koucheryavy, SPbSUT, head of the department of communication networks and data transmission, professor, Dr.Sci.(Tech.); akouch@sut.ru

Abstract. An energy-efficient IoT system has been developed based on the ESP32-CAM microcontroller and the MAX9814 microphone for recording, digitising and transmitting informative audio clips (5–15 seconds) via HTTP/UDP protocols, followed by event classification (rain, music, speech, coughing, and knocking). A hybrid architecture has been proposed, combining on-device processing with high-precision server-side classification, which allows for minimal power consumption and reduces traffic by 92% compared to continuous streaming. In real-world scenarios (office, street, and manufacturing), event classification accuracy exceeded 92% (speech recognition – 98.2% at 16 kHz) with a latency of 1.12 s over UDP and a traffic volume of less than 5 MB/day. The developed solution outperforms existing TinyML counterparts by 2–10% in terms of accuracy while maintaining a comparable level of power consumption.

Keywords: IoT system, ESP32, audio capture, segmented transmission, Audio Event Detection, hybrid machine learning, edge computing, energy efficiency, transfer learning.

For citation: *Gorbacheva, L.S.* IoT-system for capturing audio traffic and segmented data transmission using machine learning / L.S. Gorbacheva, Z.V. Kim, D.V. Nazarov et al. // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 63-74. (in russian)

REFERENCES

1. Koucheryavy, A.E. Sixth Generation Communication Networks: Fractal Architectures, Holographic Interactions, Telepresence, Network Robots / A.E. Koucheryavy, A.A.A.A. Dawood, A.N. Volkov et al. – St. Petersburg, Piter, 2024. – 320 p. (in russian)

2. Abdellah, A.R. Application of robust M-estimators for machine learning in VANETs / A.R. Abdellah, A. Muthanna, A.E. Koucheryavy // Electrosvyaz. – 2020. – No. 5. – P. 41-46. – DOI: 10.34832/ELSV.2020.6.5.006. (in russian)

3. Arinze, S.N. RF energy-harvesting techniques: applications, recent developments, challenges, and future opportunities / S.N. Arinze, E.R. Obi, S.H. Ebenuwa, A.O. Nwajana // Telecom. – 2025. – Vol. 6, No. 3. – article 45.

4. Gemmeke, J.F. Audio set: An ontology and human-labeled dataset for audio events / J.F. Gemmeke, D.P.W. Ellis, D. Freedman et al. // 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).

5. Shah, S.K. Audio IoT analytics for home automation safety / S.K. Shah, Z. Tariq, Y. Lee // 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data).

6. De la Fuente, R. Enhancing Predictive Maintenance in Mining Mobile Machinery Through a Hierarchical Inference Network / R. De la Fuente, L. Radrigan, A.S. Morales // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 59480-59504.

7. Ali, A. The Role of ESP32 in Enabling Industry 4.0 and 5.0: A Comprehensive Narrative Review of Edge Intelligence, Human-Centric Automation, and Sustainable Innovation / A. Ali, S.A. Ali, N. Zaheer / Preprint.org. – https://www.preprints.org/manuscript/202508.0014.

8. Lamaakal, I. A Comprehensive Survey on Tiny Machine Learning for Human Behavior Analysis / I. Lamaakal, S. Essahraui, Y. Maleh et al. // IEEE Internet of Things Journal. – 2025. – Vol. 12, Issue 16. – P. 32419-32443.

9. Nguyen, M.D. Edge AI-Brain-Computer Interfaces System: A Survey / M.D. Nguyen, T. Do, X.T. Tran et al. // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2025. – Vol. 33. – P. 4051-4066.

10. Ngo, D. Edge Intelligence: A Review of Deep Neural Network Inference in Resource-Limited Environments / D. Ngo, H.C. Park, B. Kang // Electronics. – 2025. – Vol. 14, Issue 12. – article 2495.

11. Kong, Q. PANNs: Large-scale pretrained audio neural networks for audio pattern recognition / Q. Kong, Y. Cao, T. Iqbal et al. // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – 2020. – Vol. 28. – P. 2880-2894.

12. David, R. TensorFlow lite micro: Embedded machine learning for TinyML systems / R. David, J. Duke, A. Jain et al. // Proceedings of Machine Learning and Systems 3 (MLSys 2021).

13. Abadade, Y. A comprehensive survey on TinyML / Y. Abadade, A. Temouden, H. Bamoumen et al. // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 96892-96922.

14. Anvarzhonov, B.N.U. A study of the application of network protocols in the IoT field for developing a robotic infrastructure / B.N.U. Anvarzhonov, A.N. Volkov, G.K. Inkin et al. // Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education: Proceedings of the XIII International Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference, in 4 vols. – St. Petersburg: SPbSUT, 2024. – P. 41-45. – EDN WBAZLH. (in russian)

15. Koucheryavy, A.E. Artificial intelligence in communication networks / A.E. Koucheryavy, A.S. Borodin, A.S.A. Muthanna et al. // Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education: Collection of Scientific Articles, in 4 vols. – St. Petersburg: SPbSUT, 2021. – Vol. 1. – P. 8-18. – EDN NRWTDL. (in russian)

16. Gorbacheva, L.S. Promising technologies in the development of digital signal processors / L.S. Gorbacheva // Innovations. Science. Education. – 2020. – No. 14. – P. 461-465. – EDN RIKYCV. (in russian).

17. Pham, V.D. A model of an energy-efficient long-range mesh network / V.D. Pham, D.A. Gallyamov, O.I. Vorozheykina, R.V. Kirichek // Electrosvyaz. – 2020. – No. 5. – P. 33-40. – DOI: 10.34832/ELSV.2020.6.5.005. (in russian)

Метод выбора каналов в гетерогенной сети интернета вещей

Н.Ф. Хоанг, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), кафедра сетей связи и передачи данных, аспирант; khoang.fn@sut.ru
А.И. Парамонов, СПбГУТ, кафедра сетей связи и передачи данных, профессор, д.т.н.; alex-in-spb@yandex.ru

УДК 621.391 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.008

Аннотация. *Предложен метод адаптивного выбора канала в гетерогенной сети интернета вещей, в которой устройство располагает несколькими независимыми каналами связи, реализованными различными физическими технологиями. Метод основан на гибридном подходе к принятию многокритериальных решений, объединяющем метод нечёткого анализа иерархий для формализации субъективных требований приложений, метод энтропийного веса для объективной оценки динамического состояния каналов и серый реляционный анализ для итогового ранжирования и выбора оптимального канала. Для разработанного метода доказаны формальные свойства: линейность степени серого отношения по параметру баланса субъективных и объективных весов и линейная вычислительная сложность, обеспечивающая работу в реальном времени на ресурсоограниченных устройствах. Эффективность метода подтверждена имитационным моделированием на наборе реальных технологий беспроводной связи интернета вещей: по достигаемой удовлетворённости приложения предложенный метод статистически значимо превосходит неадаптивный подход с равными весами во всех рассмотренных профилях трафика.*

Ключевые слова: *интернет вещей, гетерогенная сеть, выбор канала, принятие многокритериальных решений, метод нечеткой аналитической иерархии, энтропийный вес, серый реляционный анализ.*

Для цитирования: *Хоанг, Н.Ф. Метод выбора каналов в гетерогенной сети интернета вещей / Н.Ф. Хоанг, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 75-84.*

ВВЕДЕНИЕ

Развитие интернета вещей (ИВ) приводит к появлению сетей высокой и сверхвысокой плотности, которые при использовании традиционных подходов к распределению радиоресурсов сталкиваются с проблемой ограниченности радиочастотного спектра [1, 2]. Одним из перспективных решений является использование гетерогенных сетей, в которых устройства оснащены несколькими интерфейсами передачи данных, использующими различные технологии. Такой подход позволяет повысить эффективность использования доступных ресурсов и надёжность системы в целом [3–5].

Однако наличие у устройства нескольких разнородных каналов передачи данных порождает новую сложную задачу – задачу адаптивного выбора наиболее подходящего из них в каждый конкретный момент времени. Простой или статический выбор неэффективен, так как он не способен учесть ни динамически меняющиеся условия в каждом канале (например, скорость передачи, задержку доставки, вероятность потери пакетов, энергопотребление), ни специфические требования передаваемых данных, такие как приоритет, чувствительность к задержке или к энергопотреблению [6].

Для решения подобных задач часто применяются методы принятия многокритериальных решений [7]. Однако многие известные подходы имеют свои ограничения. Некоторые из них основываются на статических или чисто субъективных критериях, зависящих от предпочтений пользователя, но игнорирующих реальное состояние сети (например, классический метод анализа иерархий [8]). Другие, наоборот, учитывают только объективные параметры сети, но не принимают во внимание требования конкретного приложения. Более сложные алгоритмы, например на основе нейронных сетей, требуют значительных вычислительных ресурсов и памяти для хранения обученных моделей, что критично для устройств ИВ [9, 10].

Для устранения указанных недостатков в данной работе предлагается метод выбора канала в гетерогенной сети ИВ, основанный на гибридном подходе, который интегрирует метод нечёткого анализа иерархий (fuzzy analytic hierarchy process, FAHP) для формализации субъективных требований со стороны приложений и метод энтропийного веса для объективной оценки важности критериев на основе данных реального времени. Итоговое ранжирование и выбор оптимального канала осуществляются методом серого реляционного анализа (grey relational analysis, GRA).

Целью работы является разработка и исследование метода адаптивного выбора канала в гетерогенной сети ИВ, обеспечивающего баланс между требованиями приложений и реальным состоянием сетевых ресурсов для повышения общей эффективности функционирования сети.

МОДЕЛЬ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ

Для разработки и анализа метода построим формальную модель сети. Рассматривается линия связи между двумя узлами, каждый из которых способен организовать до m независимых каналов связи, являющихся альтернативами для передачи данных. Обозначим множество каналов $S=\{S_1, S_2, ..., S_m\}$. Эти каналы используют различные физические технологии (радио, оптические, акустические и т.д.), что обеспечивает их независимость. Возможные взаимные помехи и текущая нагрузка не моделируются явно, а абстрагируются в наблюдаемые атрибуты канала (в частности, в вероятность потери пакетов); детальные модели помех для данной физической среды приведены в [3, 4]. Модель сети показана на рис. 1.

Процесс выбора оптимального канала S_i ($i=1, ..., m$) основывается на оценке их состояния по n ключевым атрибутам (критериям). В соответствии с особенностями сетей ИВ используются пять показателей качества (рис. 2): скорость передачи данных, время доставки данных, вероятность потери данных, энергопотребление и стоимость трафика. По характеру влияния на выбор критерии делятся на атрибуты эффективности (*benefit*, «чем больше, тем лучше») и атрибуты затрат (*cost*, «чем меньше, тем лучше»). Классификация критериев приведена в табл. 1.

Совокупность значений n атрибутов для всех m каналов в конкретный момент времени представляется матрицей принятия решений размера $m \times n$:

$$\mathrm{A} = \left(a_{ij}\right)_{m\times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

где a_{ij} – значение j-го атрибута для i-го канала; m – число каналов; n – число атрибутов.

Далее матрица нормализуется. Атрибуты эффективности и затрат приводятся к безразмерному виду на отрезке [0, 1] соответственно по формулам:

$$b_{ij}^{\text{benefit}} = \frac{a_{ij} - \min\limits_i\left(a_{ij}\right)}{\max\limits_i\left(a_{ij}\right) - \min\limits_i\left(a_{ij}\right)},\ i=1, 2, ..., m; \qquad (1)$$

$$b_{ij}^{\text{cost}} = \frac{\max\limits_i\left(a_{ij}\right) - a_{ij}}{\max\limits_i\left(a_{ij}\right) - \min\limits_i\left(a_{ij}\right)},\ i=1, 2, ..., m. \qquad (2)$$

В результате формируется нормализованная матрица принятия решений

$$\mathbf{B} = (b_{ij})_{m\times n},\ \ b_{ij} \in [0,1], \qquad (3)$$

где b_{ij} – нормализованное значение j-го атрибута для i-го канала.

Рисунок 1
Модель гетерогенной сети ИВ

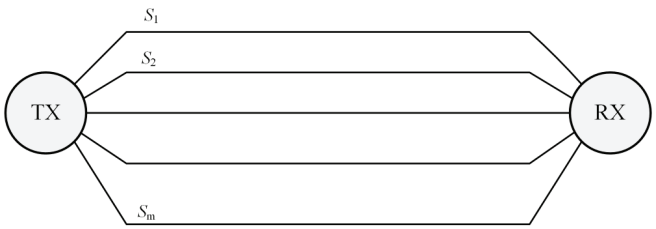


Рисунок 2
Иерархическая структура задачи принятия решения о выборе канала

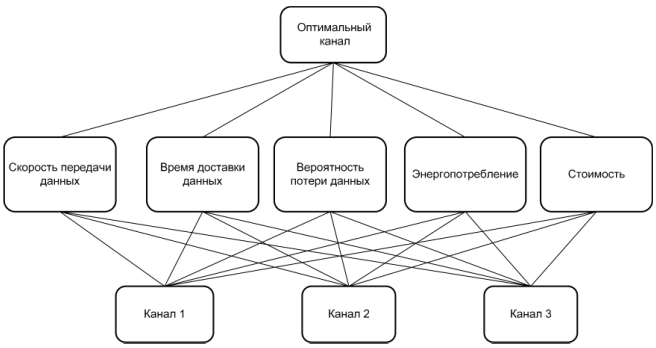


Таблица 1
Критерии оценки каналов и их тип

Обозначение	Критерий	Тип
R	скорость передачи данных, Мбит/с	benefit
D	время доставки данных, мс	cost
P	вероятность потери пакетов	cost
E	энергопотребление (средняя мощность), мВт	cost
C	стоимость трафика, усл.ед./МБ	cost

РАСЧЕТ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕТОДОМ FAHP

Для учёта субъективных требований различных типов трафика применяется метод нечёткого анализа иерархий [11]. В FAHP вводятся треугольные нечёткие числа (triangular fuzzy numbers, TFN) для построения нечёткой матрицы сравнений, что позволяет работать с неопределённостью экспертных оценок. Компоненты TFN обозначаются $\tilde{x} = (x^l, x^0, x^u)$, где x^0 – наиболее вероятное (модальное) значение оценки, а x^l и x^u – нижняя и верхняя границы диапазона возможных значений этой оценки. Функция принадлежности TFN задается следующим образом и иллюстрируется на рис. 3:

Рисунок 3
Треугольное нечёткое число

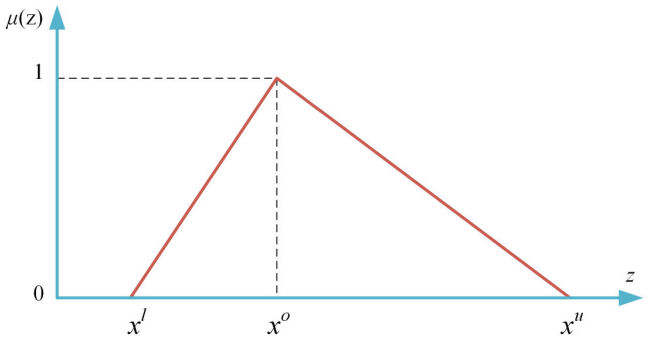


Таблица 2
Нечёткая шкала относительной важности

Значение Саати c_{ij}	Превосходство i-го атрибута над j-ым	TFN
1	одинаковая важность	(1, 1, 3)
3	умеренное превосходство	(1, 3, 5)
5	существенное превосходство	(3, 5, 7)
7	сильное превосходство	(5, 7, 9)
9	абсолютное превосходство	(7, 9, 9)

Таблица 3
Значения индекса случайной согласованности *RI*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

$$\mu_{\tilde{x}}(z)=\begin{cases}\dfrac{z-x^l}{x^0-x^l}, & \text{при } x^l \le z \le x^0;\\ \dfrac{x^u-z}{x^u-x^0}, & \text{при } x^0 \le z \le x^u;\\ 0, & \text{в противном случае.}\end{cases}$$

Процедура расчёта весов состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Построение матрицы парных сравнений. Метод анализа иерархий (analytic hierarchy process, AHP) [8] используется для определения относительной важности атрибутов путём их попарного сравнения. Оценки могут различаться для разных профилей приложений: например, для потоковой видеотелеметрии приоритетна достоверность доставки, тогда как для автономного датчика ключевым является энергопотребление. Для каждого профиля p формируется матрица парных сравнений

$$\mathbf{C}^{(p)}=(c_{ij}^{(p)})_{n\times n}=\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n}\\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn}\end{pmatrix},$$

где элемент c_{ij} при $i \ne j$ – экспертная оценка относительной важности i-го атрибута по сравнению с j-ым по шкале Саати (табл. 2); элементы c_{ij} удовлетворяют условиям обратной симметрии $c_{ij}=1/c_{ji}$ и единичной диагонали $c_{ii}=1$; $p=1, \ldots, T$ – индекс профиля; T – общее число рассматриваемых профилей приложения; n – число атрибутов.

Нечёткая интерпретация шкалы Саати: каждому чёткому значению c_{ij} ставится в соответствие TFN с постоянным разбросом ± 2 относительно c_{ij} (с усечением на границы шкалы [1, 9]) [12]; постоянство разброса обеспечивает единообразие фаззификации соседних градаций. Промежуточным значениям $c_{ij} \in \{2, 4, 6, 8\}$ соответствует TFN $(\max(1, c_{ij}-2), c_{ij}, \min(9, c_{ij}+2))$; обратному суждению ($i$-й атрибут менее важен) – поэлементно обратное TFN.

Качество результатов, полученных методом AHP, зависит от согласованности матрицы парных сравнений, которая проверяется на исходной чёткой матрице. Индекс согласованности определяется как

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}, \qquad (4)$$

где $\lambda_{\max}$ – наибольшее собственное значение чёткой матрицы. Отношение согласованности определяется как

$$CR=\frac{CI}{RI}, \qquad (5)$$

где RI – индекс случайной согласованности, который зависит от порядка матрицы (табл. 3) [8]. При $CR<0{,}1$ матрица считается согласованной, а веса – обоснованными, иначе матрицу следует переопределить.

Шаг 2. Построение нечёткой матрицы парных сравнений. Веса вычисляются отдельно для каждого профиля приложения, поэтому фаззификация применяется к чёткой матрице $\mathbf{C}^{(p)}$ конкретного профиля. Каждое чёткое суждение $c_{ij}^{(p)}$ при $c_{ij}^{(p)} \ge 1$ заменяется треугольным нечётким числом по нечёткой шкале Саати (см. табл. 2) с постоянным разбросом ± 2 и усечением на границы [1, 9]:

$$c_{ij}^l=\max\left(1, c_{ij}^{(p)}-2\right),\ c_{ij}^0=c_{ij}^{(p)},\ c_{ij}^u=\min\left(9, c_{ij}^{(p)}+2\right),$$

где $i, j=1, 2, \ldots, n$; для обратного суждения $(c_{ij}^{(p)}<1)$ берётся поэлементно обратное TFN. Нечёткая матрица сравнений профиля принимает вид

$$\tilde{\mathbf{C}}^{(p)}=(\tilde{c}_{ij})_{n\times n},\ \tilde{c}_{ij}=(c_{ij}^l, c_{ij}^0, c_{ij}^u),\ \tilde{c}_{ji}=\left(1/c_{ij}^u, 1/c_{ij}^0, 1/c_{ij}^l\right).$$

Диагональ $(c_{ii}^{(p)}=1)$ фаззифицируется по той же шкале в (1,1,3), что сохраняет единообразие обработки всех суждений.

Шаг 3. Расчёт весовых коэффициентов FAHP. Нечёткие числа дефаззифицируются методом интеграла градуированного среднего [13]:

$$a'_{ij} = \frac{c^l_{ij} + 4c^0_{ij} + c^u_{ij}}{6}. \quad (6)$$

Затем субъективные веса β_j вычисляются методом среднего геометрического (по Бакли [11]). Подчеркнём, что среднее геометрическое – это корень n-й степени из произведения элементов строки (а не из их суммы):

$$\beta_j = \frac{\left(\prod_{k=1}^{n} a'_{jk}\right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{k=1}^{n} a'_{ik}\right)^{1/n}}, \; j=1, ..., n. \quad (7)$$

По построению $\sum_{j=1}^{n}\beta_j = 1, \; \beta_j > 0.$

Для каждого профиля шаги 2 и 3 выполняются независимо и дают собственный вектор субъективных весов $\beta^{(p)}$.

РАСЧЁТ ОБЪЕКТИВНЫХ ВЕСОВ МЕТОДОМ ЭНТРОПИЙНОГО ВЕСА

Субъективные веса отражают приоритеты приложения, но не учитывают реальное динамическое состояние каналов. Для повышения объективности применяется метод энтропийного веса [14]. Его принцип: если значения атрибута для разных каналов сильно различаются (имеют высокий разброс), то такой атрибут несёт больше информации и получает больший вес; если значения почти одинаковы – его полезность для выбора снижается.

Энтропийный блок использует собственную нормировку, отличную от min-max (3): исходные данные приводятся к виду «выгода» (для cost-критериев $\hat{a}_{ij} = \max_i a_{ij} + \min_i a_{ij} - a_{ij}$, для benefit-критериев $\hat{a}_{ij} = a_{ij}$) и нормируются по сумме столбца, $p_{ij} = \hat{a}_{ij} / \sum_{i=1}^{m}\hat{a}_{ij}$. Такая (классическая по Шеннону) нормировка не порождает вырождения $0\cdot\log 0$, неизбежного при min-max-нормировке для наихудшего канала. Энтропия j-го атрибута:

$$H_j = -\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\ln p_{ij}, \; j=1, 2, ..., n, \quad (8)$$

с соглашением $0\cdot\ln 0 = 0$; выбор основания логарифма несуществен ввиду последующей нормировки. Объективный весовой коэффициент:

$$\alpha_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{k=1}^{n}(1 - H_k)}, j=1, 2, ..., n, \quad (9)$$

причём $\sum_{j=1}^{n}\alpha_j = 1, \; \alpha_j \geq 0.$

ИТОГОВЫЕ ВЕСА

Для получения единого сбалансированного вектора весов, учитывающего оба аспекта, применяется линейная комбинация субъективных и объективных весов [15]:

$$w_j = \lambda\beta_j + (1-\lambda)\alpha_j, \quad j=1, 2, ..., n, \quad (10)$$

где $\lambda \in [0, 1]$ – коэффициент баланса. Поскольку $\sum_j \beta_j = \sum_j \alpha_j = 1$, то знаменатель нормировки равен единице, и вектор $\mathbf{W}=[w_1, ..., w_n]^T$ автоматически нормирован. При $\lambda=1$ учитываются только субъективные требования (чистый FAHP), при $\lambda=0$ – только объективное состояние сети (чистая энтропия), а при промежуточных значениях λ достигается компромисс между двумя подходами.

РАНЖИРОВАНИЕ И ВЫБОР КАНАЛА МЕТОДОМ GRA

На заключительном этапе для ранжирования каналов и выбора наилучшего применяется метод серого реляционного анализа [16–18]. Метод количественно определяет степень близости каждого канала к эталонному «идеальному» объекту; наиболее близкий канал считается оптимальным.

По нормализованной матрице (3) формируется эталонный вектор, элементы которого являются наилучшими значениями по каждому атрибуту:

$$t_j = \max_i b_{ij}, \; j=1, 2, ..., n. \quad (11)$$

Коэффициент серого отношения:

$$r_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho\Delta_{\max}}, \quad (12)$$

где $\Delta_{ij} = |t_j - b_{ij}|$; $\Delta_{\min} = \min_{i,j}\Delta_{ij}$; $\Delta_{\max} = \max_{i,j}\Delta_{ij}$; $i=1, 2, ..., m$; $j=1, 2, ..., n$; $\rho \in (0, 1)$ – коэффициент различения; обычно $\rho=0{,}5$ [18]. Из коэффициентов строится матрица отношений $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m\times n}$.

Итоговая серая степень канала – взвешенная сумма с весами (10):

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} w_j, \quad i=1, ..., m. \quad (13)$$

Оптимальным признаётся канал с наибольшей степенью

$$S^* = \arg\max_i \gamma_i, \quad i=1, ..., m. \quad (14)$$

Утверждение 1 (линейность по λ). *Итоговые веса $w_j(\lambda)$ и серая степень каждого канала $\gamma_i(\lambda)$ являются аффинными функциями параметра λ. Следовательно, ранжирование каналов меняется лишь в конечном числе точек пересечения прямых $\gamma_i(\lambda)$.*

Доказательство. Из (10) имеем $w_j(\lambda) = \alpha_j + \lambda(\beta_j - \alpha_j)$ – аффинная функция λ. Серые коэффициенты r_{ij} (12)

зависят только от нормализованной матрицы **B** и не зависят от λ. Тогда

$$\gamma_i(\lambda) = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}\, w_j(\lambda) = \sum_j r_{ij}\alpha_j + \lambda \sum_j r_{ij}(\beta_j - \alpha_j)$$

является аффинной функцией λ. Разность $[\gamma_i(\lambda) - \gamma_k(\lambda)]$ также аффинна и обращается в нуль не более чем в одной точке (если только не тождественно равна нулю), что и доказывает конечность числа смен ранга.

Отметим важное свойство выбранной min-max-нормировки. После (3) эталон $t_j = \max_i b_{ij} = 1$ для всех j, поэтому $\Delta_{ij} = (1 - b_{ij}) \in [0,\ 1]$, $\Delta_{\min}=0$, $\Delta^{i}_{\max}=1$, и коэффициент серого отношения принимает вид $r_{ij} = \rho / (1 - b_{ij} + \rho)$ с производной $\partial r_{ij} / \partial b_{ij} = \rho / (1 - b_{ij} + \rho)^2 > 0$. Таким образом, r_{ij} строго возрастает по b_{ij}, а серая степень γ_i (при $w_j > 0$) – по каждому нормализованному атрибуту. Следовательно, канал, Парето-доминируемый другим каналом, никогда не получает наибольшую степень и не выбирается: вырождение r_{ij} при min-max-нормировке – не дефект, а гарантия монотонного и Парето-состоятельного правила выбора.

Полная процедура метода выбора оптимального канала в гетерогенной сети ИВ от сбора атрибутов каналов до выбора S^* производится по следующему алгоритму.

Исходные данные: матрица атрибутов каналов $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}$ (текущее состояние сети); матрица парных сравнений $\mathbf{C}^{(p)}$ профиля приложения; коэффициент баланса $\lambda \in [0, 1]$; коэффициент различения $\rho = 0{,}5$.

Результат: оптимальный канал S^*.

Шаг 1. Проверить согласованность матрицы $\mathbf{C}^{(p)}$: вычислить $\lambda_{\max}$, индекс *CI* (4) и отношение *CR* (5); если $CR \geq 0{,}1$ – пересмотреть экспертные оценки и повторить шаг.

Шаг 2. Фаззифицировать $\mathbf{C}^{(p)}$ по нечёткой шкале (см. табл. 2), дефаззифицировать элементы (6) и вычислить субъективные веса β_j методом среднего геометрического Бакли (7). Веса β_j зависят только от профиля приложения и переиспользуются, пока профиль неизменен.

Шаг 3. Нормализовать матрицу **A**: атрибуты эффективности по (1), атрибуты затрат по (2); получить матрицу $\mathbf{B} = (b_{ij})$.

Шаг 4. Вычислить объективные энтропийные веса α_j по (8) и (9).

Шаг 5. Сформировать итоговые веса $w_j = \lambda \beta_j + (1 - \lambda)\alpha_j$ (10).

Шаг 6. Построить эталонный вектор $\mathbf{t} = (t_j)$, $t_j = \max_i b_{ij}$ (11), и матрицу серых коэффициентов $\mathbf{R} = (r_{ij})$ (12).

Шаг 7. Вычислить серые степени каналов $\gamma_i = \sum_j r_{ij} w_j$ (13).

Шаг 8. Выбрать оптимальный канал $S^* = \arg\max_i \gamma_i$ (14).

Останов. Вернуть S^*.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЛОЖНОСТЬ

Утверждение 2 (вычислительная сложность). *Однократное принятие решения о выборе канала (Шаги 3–8: нормировка, энтропийные веса, GRA и выбор) выполняется за $O(m \cdot n)$ операций. Субъективные веса FAHP (Шаги 1–2) зависят только от профиля приложения, вычисляются однократно при его задании и в стоимость отдельного решения не входят.*

Доказательство. Нормировка (1)–(3), расчёт энтропии (8)–(9), матрицы (12) и сумм (13) требуют по $O(m \cdot n)$ операций; выбор максимума (14) – $O(m)$; в сумме одно решение стоит $O(m \cdot n)$. Субъективные веса β_j зависят только от профиля приложения, а не от состояния каналов: фаззификация и дефаззификация (6) затрагивают n^2 элементов, среднее геометрическое строк (7) – ещё $O(n^2)$, а проверка согласованности (4)–(5) (вычисление $\lambda_{\max}$) – $O(n^3)$. Все эти операции выполняются однократно при задании профиля над матрицей малого фиксированного порядка n и в стоимость отдельного решения не входят, поэтому сложность принятия решения остаётся $O(m \cdot n)$.

Линейная сложность одного решения обеспечивает выбор канала за доли миллисекунды для типовых значений m и делает метод выбора канала применимым в реальном времени на ресурсоограниченных устройствах ИВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель моделирования – количественно оценить выигрыш в достигаемой полезности приложения, обеспечиваемый учётом требований приложения при выборе канала, по сравнению с неадаптивным подходом, эти требования игнорирующим, на множестве случайных состояний сети. На каждой реализации обе стратегии выполняют полный конвейер и выбирают канал S^*, после чего сравнивается достигаемая полезность этого канала для приложения.

Достигаемая полезность q (удовлетворённость приложения) выбранного канала определяется единой для обеих стратегий целевой функцией:

$$q = \sum_{j=1}^{n} \beta_j \hat{b}_{S^*,j},$$

где β_j – субъективные веса профиля приложения (вычислены методом FAHP по (7)), они зафиксированы для данного профиля, безразмерны и в сумме дают единицу, поэтому едины для обеих сравниваемых стратегий и не зависят от алгоритма выбора; $\hat{b}_{S^*,j} \in [0,1]$ – атрибуты выбранного канала S^*, нормированные к фиксированному эталонному диапазону пула технологий. В отличие от относительной min-max-нормировки (3), привязанной к наилучшему каналу текущей реализации, фиксированный эталон обеспечивает сопоставимость значений достигаемой полезности q между реализациями Мон-

те-Карло. Относительный выигрыш: $\left[\left(q_* - q_0\right)/q_0\right]\cdot 100\%$, где q_* и q_0 – значения достигаемой полезности q, полученные соответственно предложенным методом и стратегией равных весов (базовый уровень).

Сравниваются две стратегии: предложенный метод в рабочей точке $\lambda=1$ (приоритет приложения, $w=\beta$, т.е. итоговые веса совпадают с субъективными) и неадаптивный метод равных весов $w_j=1/n$, игнорирующий требования приложения. Обе стратегии используют один и тот же ранжировщик GRA; различие – лишь в способе формирования весов, что изолирует вклад предложенной схемы взвешивания. Поскольку на дискретном множестве каналов выбор кусочно-постоянен по λ, полное поведение метода по всему диапазону λ представлено отдельно (рис. 4, свойство линейности), а в данном разделе приводится результат в принципиальном режиме приоритета приложения $\lambda=1$.

Рассматривается гетерогенное соединение из $m=4$ каналов, реализованных реальными технологиями ИВ; номинальные значения атрибутов (табл. 4) основаны на обзорах, измерениях и стандартах [19–26]. Скорость передачи данных в разных технологиях может отличаться на несколько порядков (у Wi-Fi 6 она в сотни и тысячи раз выше, чем у технологий LPWAN), тогда как атрибуты D, P, E, C (см. табл. 1) изменяются в значительно более узких диапазонах. Энергопотребление трактуется как средняя мощность радиомодуля (мВт): для устройств ИВ с рабочим циклом и протокольными накладными расходами это стандартный сопоставимый показатель. Набор каналов не содержит Парето-доминирующего: каждая технология выигрывает хотя бы по одному критерию (Wi-Fi 6 – R и D; BLE 5.0 – E; LoRaWAN – C; NB-IoT – P), поэтому задача выбора нетривиальна.

Таблица 4
Номинальные параметры каналов

Технология	R, Мбит/с	D, мс	P	E, мВт	C, у.е./Мбайт
Wi-Fi 6 (802.11ax)	25	15	0,024	108	0,105
BLE 5.0 (2M PHY)	2,0	60	0,030	45	0,075
LoRaWAN (EU868)	0,020	160	0,014	100	0,020
NB-IoT (Rel-13)	0,100	110	0,006	120	0,160

Таблица 5
Развёрнутый пример: профиль «достоверность», $\lambda=1$ (нормализованные значения b_{ij} и серые степени γ_i)

Канал	b_R	b_D	b_P	b_E	b_C	γ_i
Wi-Fi 6	1,000	1,000	0,250	0,160	0,393	0,509
BLE 5.0	0,079	0,690	0,000	1,000	0,607	0,439
LoRaWAN	0,000	0,000	0,667	0,267	1,000	0,571
NB-IoT	0,003	0,345	1,000	0,000	0,000	0,773

Рассматриваются три профиля приложения, задаваемые матрицами парных сравнений: достоверность (QoS-критичный трафик, доминирует низкая вероятность потери пакетов P – аварийная и событийная телеметрия); энергоприоритет (батарейный датчик, доминирует E); стоимость (массовый учёт, доминирует C). В имитации Монте-Карло динамика состояния каждого канала (замирания, нагрузка) моделируется усечённым нормальным распределением: значение a_{ij} имеет среднее, равное номиналу, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{ij}=\delta a_{ij}^{\text{ном}}/3$ (правило трёх сигм) и усекается на физически допустимый интервал $[a_{ij}^{\text{ном}}(1-\delta), a_{ij}^{\text{ном}}(1+\delta)]$ при $\Delta=0{,}25$. Гауссова модель флуктуаций реалистичнее равномерной и порождает колоколообразное распределение достигаемой полезности. Число независимых реализаций $N=1000$, зерно генератора псевдослучайных чисел зафиксировано (seed=42) для воспроизводимости. Рабочий коэффициент различения GRA $\rho=0{,}5$.

Для воспроизводимости приведём полный расчёт на номинальной матрице (табл. 4) для профиля «достоверность». Матрица парных сравнений согласована: $\lambda_{max}=5$; $CI=0$; $CR=0<0{,}1$. Субъективные веса по (7): $\beta=(0{,}089;\ 0{,}089;\ 0{,}645;\ 0{,}089;\ 0{,}089)$; объективные веса энтропии по (9): $\alpha=(0{,}639;\ 0{,}127;\ 0{,}086;\ 0{,}043;\ 0{,}105)$ (наибольший вес получает скорость R как атрибут с максимальным разбросом по технологиям). При $\lambda=1$ итоговые веса $w=\beta$. Промежуточные и итоговые величины сведены в табл. 5.

В этом профиле стратегия равных весов приводит к выбору технологии Wi-Fi 6 (универсальный канал с высокими нормализованными значениями по большинству критериев), однако приложение требует прежде всего достоверности доставки, по которой лидирует NB-IoT; предложенный метод корректно выбирает именно NB-IoT.

Рис. 4 иллюстрирует утверждение 1: серые степени $\gamma_i(\lambda)$ являются прямыми линиями, а смены лидера происходят лишь в конечном числе точек их пересечения. В частном случае совпадения субъективных и объективных весов ($\beta_j=\alpha_j$) итоговые веса равны $w_j=\beta_j$ и не зависят от λ, поэтому степени γ_i постоянны, а балансировка λ не влияет на выбор.

Рисунок 4
Линейность серой степени для трёх профилей приложения

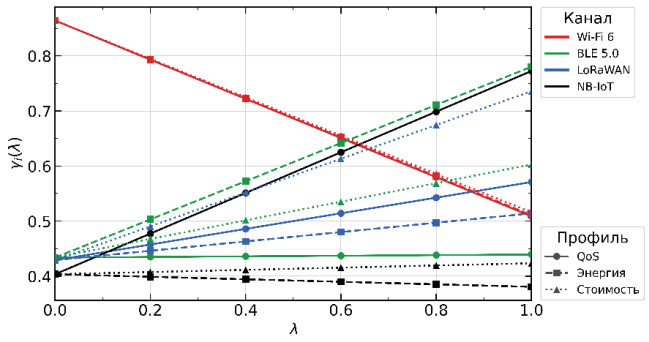


Рисунок 5
Плотность *f* (*q*) достигаемой удовлетворённости, профиль «достоверность»

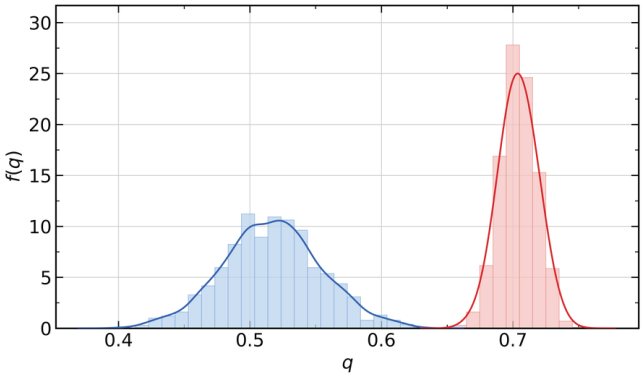


Рисунок 6
Плотность *f* (*q*), профиль «энергоприоритет»

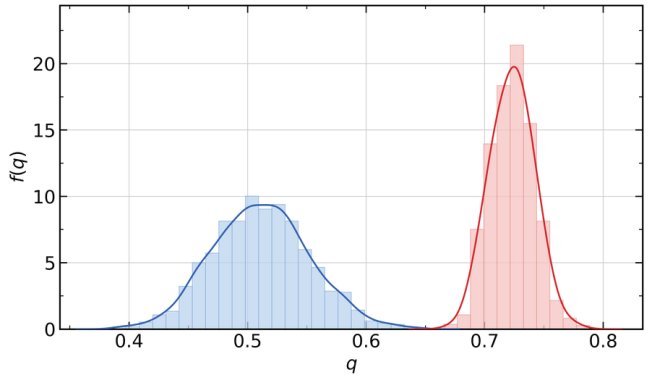
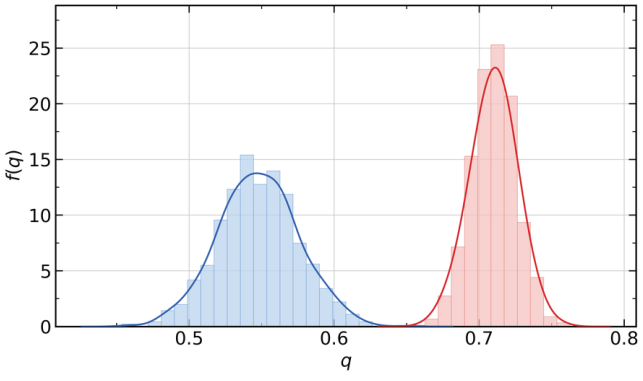


Рисунок 7
Плотность f (q), профиль «стоимость»



Основной результат – плотности распределения $f(q)$ достигаемой удовлетворённости (рис. 5–7): распределение предложенного метода смещено вправо (более высокие значения q) относительно равных весов, что отражает одновременно выигрыш в полезности и устойчивость выбора к флуктуациям состояния каналов. На рис. 5–7 синяя кривая соответствует стратегии равных весов, красная – предложенному методу. Сводные результаты по $N=1000$ реализациям приведены в табл. 6.

Во всех трёх профилях предложенный метод обеспечивает статистически значимо более высокое значение q, чем стратегия равных весов (p <0,001). Поскольку к обеим стратегиям применён один и тот же показатель q, стратегия равных весов даёт меньшее значение q именно из-за игнорирования требований приложения: эта стратегия систематически приводит к выбору универсального канала Wi-Fi 6 вместо канала, отвечающего профилю трафика (NB-IoT, BLE 5.0 или LoRaWAN). Роль энтропийной составляющей при $\lambda<1$ – внесение объективной информации о состоянии каналов и разрешение неоднозначности, когда профиль приложения задаёт близкие веса критериев; в рассмотренных профилях при $\lambda=1$, когда итоговые веса совпадают с субъективными весами β, достигается наибольшее значение q. Таким образом, режим $\lambda=1$ представляет собой предельный случай полного приоритета требований приложения; метод в целом допускает и промежуточные настройки, учитывающие объективное состояние каналов.

Эффективность предложенного метода выбора канала тем выше, чем сильнее различаются значения атрибутов каналов. Если же эти значения близки, то преимущество адаптивной стратегии по значению q уменьшается, но не исчезает: значение q в среднем остаётся не ниже, чем у стратегии равных весов. Граничный случай – профиль, приоритизирующий критерий, по которому лидирует универсальный канал (например, пиковую скорость Wi-Fi 6): тогда выбор по равным весам оказывается близок к оптимальному и преимущество предложенного метода минимально; это объективное ограничение подхода, обусловленное самой постановкой задачи.

В предложенном методе выбора канала не используется машинное обучение: обученные модели (policy-сети, функции ценности, модули графового

Таблица 6
Результаты Монте-Карло (N =1000, seed=42)

Профиль	Стратегия	q	СКО	Выигрыш,%	p
Достоверность	предложенный метод (λ=1)	0,704	0,014	+36,2	<0,001
	равные веса	0,517	0,037	0	–
Энергоприоритет	предложенный метод (λ=1)	0,723	0,018	+41,4	<0,001
	равные веса	0,511	0,041	0	–
Стоимость	предложенный метод (λ=1)	0,710	0,015	+29,6	<0,001
	равные веса	0,548	0,028	0	–

внимания, буферы воспроизведения) требуют десятков и сотен мегабайт памяти, что многократно превышает ёмкость флеш-памяти типовых IoT-микроконтроллеров (десятки или сотни килобайт) [10]. Предложенный метод выбора канала не требует обучения и хранения моделей. К его ограничениям относятся необходимость сбора исходных данных о параметрах каналов и несколько большая вычислительная сложность по сравнению с тривиальными однокритериальными правилами, остающаяся, однако, приемлемой для современных устройств ИВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод адаптивного выбора канала в гетерогенной сети интернета вещей на основе гибридного многокритериального подхода: метод нечёткого анализа иерархий формирует субъективные весовые коэффициенты требований приложения, метод энтропийного веса – объективные коэффициенты по текущему состоянию сети, а серый реляционный анализ выполняет итоговое ранжирование и выбор оптимального канала.

Доказаны формальные свойства метода: серые степени каналов являются аффинными функциями параметра баланса субъективных и объективных весов, что гарантирует конечное число смен ранга; принятая нормировка атрибутов каналов обеспечивает строгую монотонность и состоятельность правила выбора по Парето; вычислительная сложность одного решения линейна по числу каналов и критериев, благодаря чему метод выполняется за доли миллисекунды, масштабируется на произвольное число каналов и применим в реальном времени на ресурсоограниченных устройствах.

Предложена единая методика сравнительной оценки стратегий выбора канала: обе стратегии (предложенный метод и метод равных весов) оцениваются по одной фиксированной целевой функции – взвешенной сумме нормированных атрибутов выбранного канала, весовые коэффициенты которой отражают требования приложения и не зависят от используемого алгоритма выбора.

По результатам имитационного моделирования методом Монте-Карло (1000 независимых реализаций, четыре реальные технологии беспроводной связи интернета вещей) предложенный метод выбора канала статистически значимо превосходит неадаптивный подход с равными весами во всех трёх рассмотренных профилях трафика (достоверность, энергоприоритет и стоимость): прирост достигаемой удовлетворённости приложения составил от 29,6% до 41,4%.

Параметр баланса субъективных и объективных весов обеспечивает гибкую настройку метода – от приоритета требований приложения до приоритета объективного состояния каналов; при этом распределение достигаемой полезности метода имеет меньшую дисперсию, чем у неадаптивного подхода, что свидетельствует об устойчивости решений к флуктуациям состояния каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hassan, R. Internet of Things and its applications: A comprehensive survey / R. Hassan, F. Qamar, M.K. Hasan et al. // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, Issue 10. – article 1674. – DOI: 10.3390/sym12101674.

2. Кучерявый, А.Е. Триллионные сети / А.Е. Кучерявый // Телекоммуникации. – 2013. – № S7. – С. 19-22. – EDN: REKFXF.

3. Кучерявый, А.Е. Методы распределения рафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности / А.Е. Кучерявый, Д.В. Окунева, А.И. Парамонов, Н.Ф. Хоанг // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 67-74. – DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. – EDN: RTNVEU.

4. Тонких, Е.В. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности / Е.В. Тонких, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – № 1. – С. 44-48. – DOI: 10.34832/ELSV.2020.2.1.006. – EDN: IWAHZO.

5. Hasan, N.U. Network selection and channel allocation for spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / N.U. Hasan, W. Ejaz, N. Ejaz et al. // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 980-992.

6. Qiu, T. How Can Heterogeneous Internet of Things Build Our Future: A Survey / T. Qiu, N. Chen, K. Li et al. // IEEE Communications

Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, Issue 3. – P. 2011-2027. – DOI: 10.1109/COMST.2018.2803740. – EDN: YFGIPJ.
7. Obayiuwana, E. Network selection in heterogeneous wireless networks using multi-criteria decision-making algorithms: a review / E. Obayiuwana, O.E. Falowo // Wireless Networks. – 2017. – Vol. 23, Issue 8. – P. 2617-2649.
8. Saaty T.L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation / T.L. Saaty. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 p.
9. Noaman, M. Challenges in Integration of Heterogeneous Internet of Things / M. Noaman, M.S. Khan, M.F. Abrar et al. // Scientific Programming. – 2022. – article 8626882. – DOI: 10.1155/2022/8626882. – EDN: KXZSPZ.
10. David, R. TensorFlow Lite Micro: Embedded Machine Learning for TinyML Systems / R. David, J. Duke, A. Jain et al. // Proceedings of Machine Learning and Systems (MLSys). – 2021. – Vol. 3. – P. 800-811.
11. Buckley, J.J. Fuzzy hierarchical analysis / J.J. Buckley // Fuzzy Sets and Systems. – 1985. – Vol. 17, no. 3. – P. 233-247. – DOI: 10.1016/0165-0114(85)90090-9.
12. Van Laarhoven, P.J.M. A fuzzy extension of Saaty's priority theory / P.J.M. Van Laarhoven, W. Pedrycz // Fuzzy Sets and Systems. – 1983. – Vol. 11, no. 1-3. – P. 229-241. – DOI: 10.1016/S0165-0114(83)80082-7.
13. Yong, D. Plant location selection based on fuzzy TOPSIS / D. Yong // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28, no. 7. – P. 839-844. – DOI: 10.1007/s00170-004-2436-5.
14. Yu, H.W. A heterogeneous network selection algorithm based on network attribute and user preference / H.W. Yu, B. Zhang // Ad Hoc Networks. – 2018. – Vol. 72. – P. 68-80. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.01.011.
15. Ai, X. Network selection issue in heterogeneous wireless environment / X. Ai, W. Zhou, B. Xie, J. Song // 2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference. – DOI: 10.1109/WCNC.2010.5506653.
16. Verma, R. GRA based network selection in heterogeneous wireless networks / R. Verma, N.P. Singh // Wireless personal communications. – 2013. – Vol. 72, Issue 2. – P. 1437-1452. – DOI: 10.1007/s11277-013-1087-y.
17. Yang, W. A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem / W. Yang, Y. Wu // Mathematical Problems in Engineering. – Vol. 2019. – article ID 8761681. – DOI: 10.1155/2019/8761681.
18. Liu, S.·Grey Systems Analysis: Methods, Models and Applications / S. Liu, Y. Yang, J.Y.-L. Forrest. – Singapore: Springer, 2022. – DOI:10.1007/978-981-19-6160-1.
19. Mekki, K. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment / K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer // ICT Express. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – P. 1-7. – DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
20. Augustin, A. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things / A. Augustin, J. Yi, T.H. Clausen, W.M. Townsley // Sensors. – 2016. – Vol. 16, no. 9. – article 1466. – DOI: 10.3390/s16091466.
21. Khorov, E. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs / E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, no. 1. – P. 197-216. – DOI: 10.1109/COMST.2018.2871099.
22. Collotta, M. Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT / M. Collotta, G. Pau, T. Talty, O.K. Tonguz // IEEE Communications Magazine. – 2018. – Vol. 56, no. 7. – P. 125-131. – DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700053.
23. Wang Y.-P. E. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT) / Y.-P.E. Wang, X. Lin, A. Adhikary et al. // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, no. 3. – P. 117-123. – DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM.
24. Raza, U. Low Power Wide Area Networks: An Overview / U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, no. 2. – P. 855-873. – DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
25. Liu, R. A First Look at Wi-Fi 6 in Action: Throughput, Latency, Energy Efficiency, and Security / R. Liu, N. Choi // Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems. – 2023. – Vol. 7, no. 1. – article 25. – DOI: 10.1145/3579451.
26. Orlovs, D. LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison / D. Orlovs, A. Rusins, V. Skrastins, J. Judvaitis // IoT. – 2025. – Vol. 6, no. 4. – article 77. – DOI: 10.3390/iot6040077.

Получено 23.04.2026;
принято к печати 29.04.2026

Channel selection method in a heterogeneous Internet of Things network

N.P. Hoang, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), department of communication networks and data transmission, postgraduate; khoang.fn@sut.ru

A.I. Paramonov, SPbSUT, department of communication networks and data transmission, professor, Dr.Sci.(Tech.); alex-in-spb@yandex.ru

Abstract. A method for adaptive channel selection in a heterogeneous Internet of Things network is proposed, in which a device has several independent communication channels implemented by different physical technologies. The method is based on a hybrid multi-criteria decision-making approach that combines the fuzzy analytic hierarchy process to formalise subjective application requirements, the entropy weight method to objectively assess the dynamic state of channels, and grey relational analysis to perform the final ranking and selection of the optimal channel. Formal properties of the proposed method are proved: linearity of the grey relational grade with respect to the balance parameter between subjective and objective weights and linear computational complexity, enabling real-time operation on resource-constrained devices. The effectiveness of the method is confirmed by simulation modelling on a set of real Internet of Things wireless technologies: in terms of achieved application satisfaction, the proposed method statistically significantly outperforms the non-adaptive equal-weighting approach across all considered traffic profiles.

Keywords: Internet of Things, heterogeneous network, channel selection, multi-criteria decision making, fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), entropy weight, grey relational analysis (GRA).

For citation: Hoang, N.P. Channel selection method in a heterogeneous Internet of Things network / N.P. Hoang, A.I. Paramonov // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 75-84. (in russian)

REFERENCES

1. Hassan, R. Internet of Things and its applications: A comprehensive survey / R. Hassan, F. Qamar, M.K. Hasan et al. // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, Issue 10. – article 1674. – DOI: 10.3390/sym12101674.

2. Kucheryavy, A.E. Trillion Networks / A.E. Kucheryavy // Telecommunications. – 2013. – no. S7. – P. 19-22. (in russian)

3. Kucheryavy, A.E. Traffic Distribution Methods in a High-Density Heterogeneous Internet of Things Network / A.E. Kucheryavy, D.V. Okuneva, A.I. Paramonov, N.F. Hoang // Proceedings of Telecommunication Universities. – 2024. – Vol. 10, no. 2. – P. 67-74. – DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. (in russian)

4. Tonkikh, E.V. Analysis of wireless high-density IoT network / E.V. Tonkikh, A.I. Paramonov, A.E. Kucheryavy // Electrosvyaz. – 2020. – no. 1. – P. 44-48. – DOI: 10.34832/ELSV.2020.2.1.006. (in russian)

5. Hasan, N.U. Network selection and channel allocation for spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / N.U. Hasan, W. Ejaz, N. Ejaz et al. // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 980-992.

6. Qiu, T. How Can Heterogeneous Internet of Things Build Our Future: A Survey / T. Qiu, N. Chen, K. Li et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, Issue 3. – P. 2011-2027. – DOI: 10.1109/COMST.2018.2803740. – EDN: YFGIPJ.

7. Obayiuwana, E. Network selection in heterogeneous wireless networks using multi-criteria decision-making algorithms: a review / E. Obayiuwana, O.E. Falowo // Wireless Networks. – 2017. – Vol. 23, Issue 8. – P. 2617-2649.

8. Saaty T.L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation / T.L. Saaty. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 p.

9. Noaman, M. Challenges in Integration of Heterogeneous Internet of Things / M. Noaman, M.S. Khan, M.F. Abrar et al. // Scientific Programming. – 2022. – article 8626882. – DOI: 10.1155/2022/8626882. – EDN: KXZSPZ.

10. David, R. TensorFlow Lite Micro: Embedded Machine Learning for TinyML Systems / R. David, J. Duke, A. Jain et al. // Proceedings of Machine Learning and Systems (MLSys). – 2021. – Vol. 3. – P. 800-811.

11. Buckley, J.J. Fuzzy hierarchical analysis / J.J. Buckley // Fuzzy Sets and Systems. – 1985. – Vol. 17, no. 3. – P. 233-247. – DOI: 10.1016/0165-0114(85)90090-9.

12. Van Laarhoven, P.J.M. A fuzzy extension of Saaty's priority theory / P.J.M. Van Laarhoven, W. Pedrycz // Fuzzy Sets and Systems. – 1983. – Vol. 11, no. 1-3. – P. 229-241. – DOI: 10.1016/S0165-0114(83)80082-7.

13. Yong, D. Plant location selection based on fuzzy TOPSIS / D. Yong // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28, no. 7. – P. 839-844. – DOI: 10.1007/s00170-004-2436-5.

14. Yu, H.W. A heterogeneous network selection algorithm based on network attribute and user preference / H.W. Yu, B. Zhang // Ad Hoc Networks. – 2018. – Vol. 72. – P. 68-80. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.01.011.

15. Ai, X. Network selection issue in heterogeneous wireless environment / X. Ai, W. Zhou, B. Xie, J. Song // 2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference. – DOI: 10.1109/WCNC.2010.5506653.

16. Verma, R. GRA based network selection in heterogeneous wireless networks / R. Verma, N.P. Singh // Wireless personal communications. – 2013. – Vol. 72, Issue 2. – P. 1437-1452. – DOI: 10.1007/s11277-013-1087-y.

17. Yang, W. A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem / W. Yang, Y. Wu // Mathematical Problems in Engineering. – Vol. 2019. – article ID 8761681. – DOI: 10.1155/2019/8761681.

18. Liu, S.·Grey Systems Analysis: Methods, Models and Applications / S. Liu, Y. Yang, J.Y.-L. Forrest. – Singapore: Springer, 2022. – DOI:10.1007/978-981-19-6160-1.

19. Mekki, K. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment / K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer // ICT Express. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – P. 1-7. – DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005.

20. Augustin, A. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things / A. Augustin, J. Yi, T.H. Clausen, W.M. Townsley // Sensors. – 2016. – Vol. 16, no. 9. – article 1466. – DOI: 10.3390/s16091466.

21. Khorov, E. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs / E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, no. 1. – P. 197-216. – DOI: 10.1109/COMST.2018.2871099.

22. Collotta, M. Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT / M. Collotta, G. Pau, T. Talty, O.K. Tonguz // IEEE Communications Magazine. – 2018. – Vol. 56, no. 7. – P. 125-131. – DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700053.

23. Wang Y.-P. E. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT) / Y.-P.E. Wang, X. Lin, A. Adhikary et al. // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, no. 3. – P. 117-123. – DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM.

24. Raza, U. Low Power Wide Area Networks: An Overview / U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, no. 2. – P. 855-873. – DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.

25. Liu, R. A First Look at Wi-Fi 6 in Action: Throughput, Latency, Energy Efficiency, and Security / R. Liu, N. Choi // Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems. – 2023. – Vol. 7, no. 1. – article 25. – DOI: 10.1145/3579451.

26. Orlovs, D. LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison / D. Orlovs, A. Rusins, V. Skrastins, J. Judvaitis // IoT. – 2025. – Vol. 6, no. 4. – article 77. – DOI: 10.3390/iot6040077.

Определение условий обеспечения ЭМС сетей ТВ-вещания и 5G/IMT-2020 (NR) в диапазоне частот ниже 1 ГГц

А.А. Моченов, ФГАУ НИЦ Телеком, заместитель начальника отдела; mochenovaa@nic-t.ru

УДК 621.396.74 DOI: 10.34832/ELSV.2026.81.7.009

Аннотация. *Представлены результаты лабораторных исследований по определению значений защитных отношений и порогов перегрузки приемников цифрового ТВ-вещания стандарта DVB-T2 при помеховом воздействии от сигналов базовых и абонентских станций стандарта 5G/IMT-2020 (NR) с частотой ниже 1 ГГц. Проведено моделирование условий электромагнитной совместимости для сценария совместного использования ТВ-вещания и базовых станций стандарта 5G/IMT-2020 (NR) в смежных полосах частот на основе метода Монте-Карло.*

Ключевые слова: *цифровой дивиденд, электромагнитная совместимость, ЭМС, частотно-территориальное разнесение, защитные отношения, порог перегрузки, моделирование, DVB-T2, 5G/IMT-2020 (NR).*

Для цитирования: *Моченов, А.А. Определение условий обеспечения ЭМС сетей ТВ-вещания и 5G/IMT-2020 (NR) в диапазоне частот ниже 1 ГГц / А.А. Моченов // Электросвязь. – 2026. – № 7. – С. 85-92.*

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное внедрение сетей связи на базе технологии 5G NR в условиях практически полной занятости радиочастотного спектра другими технологиями возможно только при использовании участков спектра в диапазоне ниже 1 ГГц. Одним из приоритетных низкочастотных диапазонов развития перспективной технологии является полоса радиочастот 694–790 МГц. В настоящее время данный диапазон используется радиовещательной службой для трансляций пакетов цифровых телевизионных каналов [1, 2]. В то же время для развития современных и перспективных технологий мобильной связи существует потребность в спектральном ресурсе, в частности в диапазоне частот ниже 1 ГГц. С учетом потенциальной возможности частичного или полного высвобождения полосы радиочастот 694–790 МГц от действующих станций телерадиовещания, возможны различные сценарии реализации второго цифрового дивиденда [3]. Данный диапазон открывает широкие возможности для расширения действующих сетей мобильной связи четвертого поколения стандарта LTE, а также для внедрения перспективной технологии 5G NR.

Обеспечение беспомеховой работы сетей мобильной связи и радиовещательной службы возможно при соблюдении однозначно определённых критериев электромагнитной совместимости (ЭМС) и условий совместного использования РЭС. При защите телевизионных приёмников в качестве основных критериев ЭМС используются значения защитных отношений и порогов перегрузки при различных частотных отстройках.

В статье рассматриваются основные сценарии совместного использования подвижной и радиовещательной служб, определение критериев ЭМС, методы и результаты лабораторных измерений.

Дополнительно приводятся результаты компьютерного моделирования с использованием метода Монте-Карло с оценкой вероятности возникновения помех приёму ТВ-вещания от перспективных сетей связи стандарта 5G/IMT2020 в диапазоне частот ниже 1 ГГц.

КРИТЕРИИ ЭМС ДЛЯ СИСТЕМ DVB-T2 И LTE/5G

Один из рассмотренных в [3] сценариев предполагает совместное использование вещательной и подвижной служб на основе территориального сегрегирования в зависимости от интенсивности использования радиоэлектронных средств (РЭС), количества свободного частотного ресурса и потребностей в услугах вещания и передачи данных в конкретном регионе.

Исследования МСЭ [4, 5] показали, что РЭС этих двух служб не могут функционировать совместно в одних и тех же полосах частот на одних и тех же территориях из-за взаимных помех. Существует несколько

ситуаций, когда требуются существенные частотно-территориальные разносы между РЭС сухопутной подвижной службы стандартов LTE/5G NR и радиовещательной службой. В частности, соканальное воздействие базовых станций (БС) сетей LTE/5G NR на приемники ТВ-вещания требует значительных территориальных разносов (более 100 км), так же как и влияние передатчиков ТВ-вещания на прием БС стандартов LTE/5G NR. Помимо этого, существенные ограничения накладываются на работу сетей стандартов LTE/5G NR в соседних с ТВ-вещанием каналов. Данная проблема существует как для базовых, так и для абонентских станций.

С точки зрения внедрения сетей стандартов LTE/5G NR сценарии соканального воздействия являются более критичными. В случае работы ТВ-канала в регионе большие территориальные разносы являются ожидаемыми. При этом переиспользование данного канала в сетях ТВ-вещания также требует больших территориальных разносов. В то же время наличие больших частотных разносов по соседнему каналу может привести к невозможности развертывания сетей стандартов LTE/5G NR практически в любом регионе из-за специфики использования ТВ-каналов в полосе радиочастот 694–790 МГц. В отличие от соканальной помехи, которая определяется в основном условиями распространения сигнала (околоземное, тропосферное), помехи в соседнем канале определяются внеполосными излучениями передатчиков, селективностью приемников, особенностями работы алгоритмов управления мощностью, уровнями ТВ-сигналов в районе развертывания сетей LTE/5G NR.

Уровень помехового влияния БС оценивается в первую очередь такими параметрами, как:

- внеполосные излучения передатчика БС, определяемые значением коэффициента утечки мощности в соседний канал (adjacent channel leakage power ratio, ACLR) и нежелательными излучениями в рабочем диапазоне базовой станции (operating band unwanted emissions, OBUE);
- побочные излучения передатчика БС за пределами рабочего диапазона.

Существует две категории класса макро-БС, определяющие предельные уровни внеполосных излучений – А и Б. Для категории Б в стандартах LTE и 5G NR предусматривается более строгая маска внеполосных излучений, применяемая по региональным требованиям, например для защиты особо чувствительных к помехам РЭС, работающих в соседних полосах частот. Для данной категории пределы в области внеполосного излучения ужесточаются на 2–3 дБ, а в области побочных излучений – на 10–20 дБ по сравнению с требованиями к БС категории А.

Стандарт 5G NR демонстрирует преемственность стандарту предыдущего четвертого поколения LTE, в частности в требованиях к спектральной маске излучения сигнала. В диапазоне радиочастот до 1 ГГц для макро-БС стандарта 5G NR установлены следующие предельные уровни нежелательного излучения:

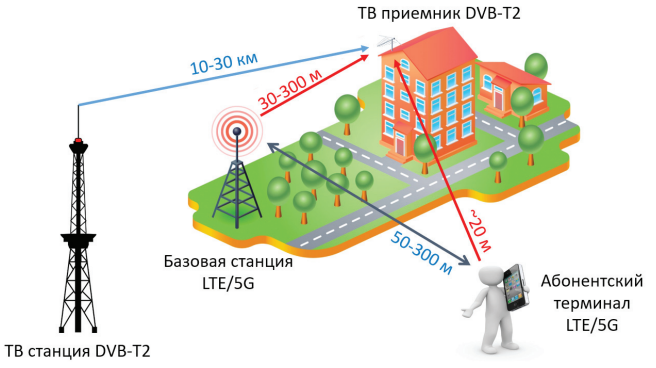
- –13 дБм/100 кГц и –16 дБм/100 кГц за пределами рабочей полосы БС категорий А и Б;
- коэффициент утечки мощности в соседний канал не менее 45 дБ;
- уровень побочных излучений не более –13 дБм/100 кГц и –36 дБм/100 кГц для БС категорий А и Б в диапазоне радиочастот ниже 1 ГГц.

Применение БС той или иной категории определяется национальным регулятором. Спецификации консорциума 3GPP [6, 7] предоставляют возможность двух вариантов использования. Для уменьшения внутрисистемных и внешних помех целесообразно применение класса макро-БС категории Б.

Условия обеспечения ЭМС сетей LTE/5G NR и ТВ-вещания, работающих на разных частотах (случай соседних каналов), и соответствующие ограничения на их работу зависят от технических характеристик и топологии сетей. На рис. 1 проиллюстрировано взаимное расположение элементов сетей мобильной связи и эфирных телевизионных сетей, предоставляющих услуги на одной территории.

Основным критерием ЭМС для сценариев воздействия помех со стороны РЭС сухопутной подвижной службы на приемники ТВ-вещания являются защитные отношения и пороги перегрузки. В [8] приведены значения критериев ЭМС, применяемые при защите радиовещательной службы от сетей LTE, LTE-Advanced и 5G/IMT2020. Указанные защитные отношения и пороги перегрузки основаны на измерениях, проведенных в Великобритании до 2015 г. при использовании имевшихся на тот период времени телевизионных цифровых тюнеров [9].

Рисунок 1
Схематичное размещение элементов сетей мобильной связи и ТВ-вещания



Данные измерения проводились с использованием записанного сигнала LTE с шириной полосы 10 МГц, создаваемого реальным оборудованием базовых и абонентских станций при трех различных значениях информационной нагрузки (1 Мбит/с, 10 Мбит/с и 20 Мбит/с). В Рекомендации МСЭ-R BT.2033-1 [10] отмечено, что в настоящее время происходят изменения в области совместного использования частот системами DVB-T2 и сетями подвижной связи, при этом изменяется конструкция телевизионных тюнеров и плотность размещения БС. Производители стремятся улучшить эксплуатационные характеристики соответствующего оборудования, так что в ближайшем будущем приведенные данные о защитных отношениях и порогах перегрузки могут быть пересмотрены.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАЩИТНЫХ ОТНОШЕНИЙ И ПОРОГОВ ПЕРЕГРУЗКИ

С целью валидации критериев ЭМС были проведены лабораторные испытания по определению значений защитных отношений и порогов перегрузки от помеховых сигналов РЭС стандарта 5G/IMT2020, работающих в полосе радиочастот 703–733 МГц и 758–788 МГц (рис. 2), влияющих на качество приема сигналов наземных цифровых телевизионных станций DVB-T2, работающих в соседних полосах радиочастот 470–694 МГц (21-48 ТВ-каналы). Стендовые испытания проводились на территории ФГАУ НИЦ Телеком.

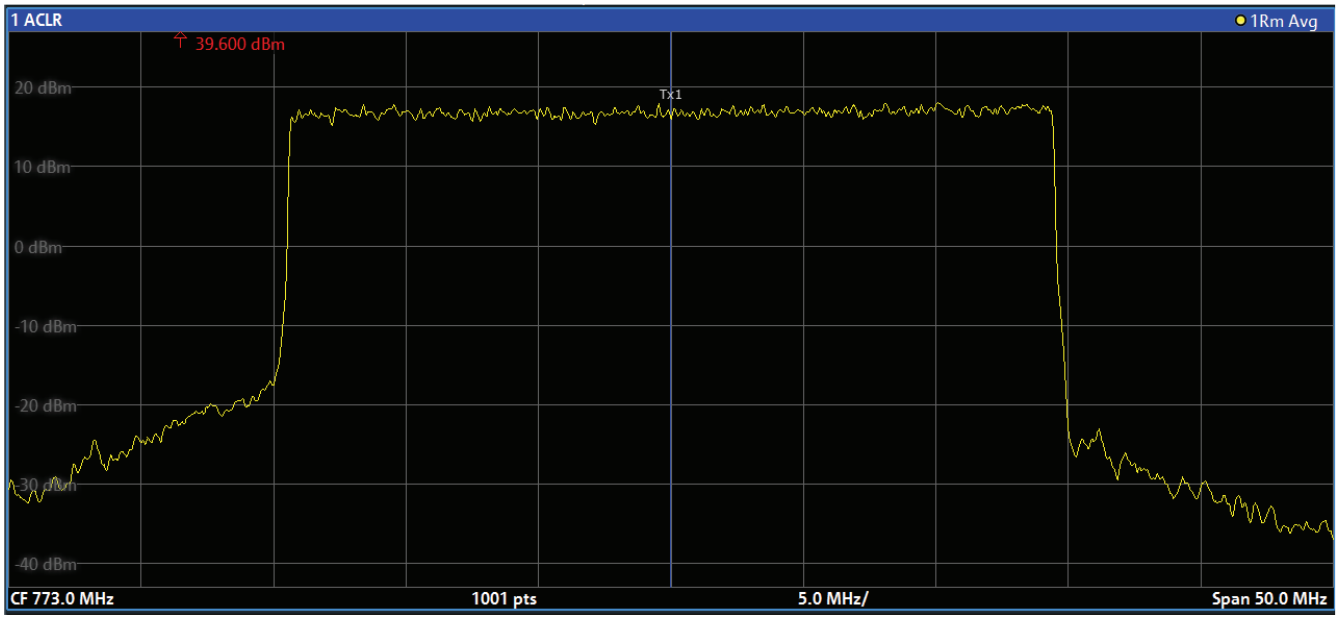
Принцип определения значений защитных отношений и порогов перегрузки основан на сравнении уровней полезного и помехового сигналов, при которых ухудшается качество тестового изображения и звукового сопровождения телевизионного сигнала. Более подробное описание методики измерений приведено в [11].

Полезный сигнал DVB-T2 формировался с использованием радиовещательного тестера Rohde & Schwarz SFE. Мешающий сигнал 5G/IMT2020 был сформирован с использованием генератора сигналов Rohde & Schwarz SMW200A. В нисходящем канале использовалась конфигурация с шириной частотного блока 30 МГц и расстоянием между соседними поднесущими 15 кГц, а в качестве тестового режима передачи был выбран TM1. Для имитации нагрузки в трафиковых каналах использовалась псевдослучайная последовательность.

Защитное отношение для полезного сигнала DVB-T2 представляет собой отношение полезного сигнала к мешающему сигналу 5G/IMT2020. Полученные в результате обработки результатов лабораторных испытаний значения защитных отношений и порогов перегрузки для сигналов DVB-T2 (64-QAM 4/5), испытывающих помехи от сигналов БС сотовых сетей в диапазоне радиочастот 758–788 МГц (band 28), приведены в табл. 1 и 2. Для данных сценариев обеспечиваются минимальная и максимальная разделительные полосы 64 МГц и 280 МГц между рабочими частотными диапазонами.

В табл. 1 и 2 90-й процентиль для значения защитного отношения соответствует защите 90% измеренных приемников с учетом заданного сдвига и параметра частоты; для защиты 90% измеренных

Рисунок 2
Спектр сигнала 5G/IMT-2020 (NR) в диапазоне частот 758–788 МГц (линия вниз)



приемников должен использоваться 10-й процентиль для порога перегрузки.

По результатам лабораторных испытаний и последующего сравнительного анализа выявлено релятивное соответствие измеренных и рекомендованных в [8] значений защитных отношений для сигнала DVB-T2, испытывающего помехи от сигналов БС сотовых сетей связи. Выявлена незначительная разница в величинах защитных отношений (до 2 дБ) между тестируемыми ТВ-приемниками. При этом отмечается улучшение помехоустойчивости ТВ-приставок по порогу перегрузки на 7 дБ относительно рекомендованных значений [8]. Важно отметить практически эквивалентные значения измеренных критериев ЭМС независимо от величины разделительной полосы частот.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

На основании проведенных лабораторных испытаний установлено следующее:

- помеховое влияние сигналов БС стандарта 5G/IMT2020 на качество приема сигнала эфирного цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T2 наблюдается во всем диапазоне радиочастот 470–694 МГц. Испытания не выявили существенной разницы относительных уровней помех при воздействии на нижних и высоких ТВ-каналах в дециметровом диапазоне;
- блокирование бытовой ТВ-приставки с невозможностью декодирования полезного сигнала DVB-T2 вне зависимости от радиочастотного канала, на котором осуществляется прием полезного сигнала, происходило при уровне мешающего сигнала БС от –2,9 до 3,0 дБм. При типичных параметрах излучения БС (мощность передатчика 40 Вт, коэффициент усиления антенны 15 дБи) и эталонных параметрах антенно-фидерного тракта ТВ-приемника данный уровень достигается на расстоянии до 110 м от БС в азимуте максимального излучения при условии распространения в свободном пространстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки вероятности возникновения помех приёму ТВ-вещания от перспективных сетей связи стандарта 5G/IMT2020 в диапазоне частот ниже 1 ГГц было проведено стохастическое моделирование с использованием метода Монте-Карло в программ-

Таблица 1

Защитные отношения и пороги перегрузки для сигнала DVB-T2 (64-QAM 4/5) 48 ТВ-канала при помехах от сигналов 5G/IMT2020 band 28 (линия вниз)

Наименование ТВ-приставки	Защитное отношение PR, дБ	Защитное отношение PR, дБ (50-й процентиль)	Защитное отношение PR, дБ (90-й процентиль)	Порог перегрузки O_{th}, дБм	Порог перегрузки O_{th}, дБм (50-й процентиль)	Порог перегрузки O_{th}, дБм (10-й процентиль)
Mystery MMP-85DT2	–46	–46	–44,4	6,5	3,0	–2,9
Hyundai H-DVB01T2	–45			–3,5		
DENN DDT151	–44			7,5		
Oriel 810	–46			7,5		
TV STAR T2 505	–46			–1,5		

Таблица 2

Защитные отношения и пороги перегрузки для сигнала DVB-T2 (64-QAM 4/5) 21 ТВ-канала при помехах от сигналов 5G/IMT2020 band 28 (линия вниз)

Наименование ТВ-приставки	Защитное отношение PR, дБ	Защитное отношение PR, дБ (50-й процентиль)	Защитное отношение PR, дБ (90-й процентиль)	Порог перегрузки O_{th}, дБм	Порог перегрузки O_{th}, дБм (50-й процентиль)	Порог перегрузки O_{th}, дБм (10-й процентиль)
Mystery MMP-85DT2	–45	–46	–45,4	5,5	3,0	–2,9
Hyundai H-DVB01T2	–46			–2,5		
DENN DDT151	–47			10,5		
Oriel 810	–46			7,5		
TV STAR T2 505	–46			–1,5		

Таблица 3
Основные тактико-технические характеристики системы ТВ вещания DVB-T2 и сетей стандарта 5G/IMT2020

Наименование параметра	Значение параметра	
	ТВ станция DVB-T2	Базовая станция 5G/IMT2020
Рабочие диапазоны радиочастот для передатчиков, МГц	470–690	758–788
Мощность передатчика, дБм	60	46
Коэффициент усиления антенн, дБи	6	15
Тип антенн	всенаправленная	панельная 3 сектора
Ширина канала, МГц	8	30
Поляризация	горизонтальная	наклонная
Высота подвеса антенн, м	150	30

ной среде SEAMCAT [12]. Программное обеспечение представляет собой специализированный инструмент для моделирования и оценки электромагнитной совместимости РЭС систем радиосвязи.

Метод Монте-Карло часто используется при определении условий ЭМС, требующих учета неопределенностей и вариаций параметров при распространении радиосигналов, характеристик приемников и передатчиков, а также прочих факторов, влияющих на качество связи. Данный метод основан на многократной случайной выборке параметров радиосистем и анализе распределения результатов, что обеспечивает высокую точность прогнозирования условий совместного использования различных РЭС.

Моделирование было выполнено с использованием детерминированного подхода, при котором вариация параметров, свойственная системам радиосвязи с подвижными абонентами, может привести к недостоверным результатам. По этой причине не использовались в частности такие программно-методические комплексы, как «Ракурс-М», «Эфир» и RadioPlanner [13].

Стохастическое моделирование проведено с учётом результатов лабораторных испытаний для типичных тактико-технических характеристик приёмного и передающего оборудования как системы ТВ-вещания DVB-T2 [14], так и перспективных сетей стандарта 5G/IMT2020 (табл. 3) [15].

В симуляциях приёмное и передающее оборудование размещалось в условиях сельской местности. Место установки ТВ-станции фиксировалось, а размещение макро-БС с трёхсекторной компоновкой ячеек в форме гексагона осуществлялось случайным образом в каждой из итераций в пределах зоны обслуживания ТВ-передатчика. Модель ТВ приёмника включала наружную пассивную антенну без усилителя на высоте 10 м. Прием на наружную антенну обычно осуществляется в сельской и пригородной местности при небольшом удалении от телерадиопередающей станции. При удалении от телерадиопередающей станции в несколько десятков километров, где уровень ТВ сигнала близок к минимальной используемой напряженности поля, абоненты чаще используют активную направленную антенну с коэффициентом усиления более 30 дБд. Однако при таком сценарии накладываются дополнительные ограничения на совместное использование РЭС подвижной и радиовещательной служб не только для смежных радиочастотных каналов, но и во всей распределенной для целей ТВ вещания полосе радиочастот 470–790 МГц (21–60 ТВ каналы), поскольку также возрастает вероятность блокирования приема ТВ сигнала из-за усиления в том числе и помехового сигнала БС. В качестве примера на рис. 3 приведен ситуационный план размещения рассматриваемых систем радиосвязи при одной из итераций.

На рис. 3 схематично отображены источники и рецептор помех: красными точками обозначены БС сотовой связи, жёлтыми – абонентские терминалы, расположенные в пределах зон обслуживания, зелёная точка соответствует месту размещения ТВ-станции стандарта DVB-T2, а чёрная точка – ТВ-приёмнику. В каждой из итераций определялась суммарная помеха на ТВ-приёмнике от каждой БС моделируемого кластера сотовой сети. Общее количество потенциальных источников помех (базовых станций) в каждой из итераций составляло 20.

С целью получения доверительного распределения оценки ЭМС было выполнено 10 тыс. итераций.

На рис. 4 показана кумулятивная функция распределения (cumulative distribution function, CDF) помехового воздействия от БС стандарта 5G/IMT2020 на приёмники ТВ-вещания. Вертикальная красная линия на представленном графике характеризует граничный критерий помехового воздействия.

Кумулятивная функция распределения включает в себя все возможные механизмы помехового воздействия на приёмники ТВ-вещания, в том числе нежелательные излучения БС в области расширенных внеполосных излучений, а также учитывает возможную перегрузку входного тракта приёмника из-за сигнала источника помех с высоким уровнем. Как видно из графика на рис. 4, вероятность помехового воздействия составляет 0,032 (или 3,2%). В

Рисунок 3
Размещение элементов сетей мобильной связи и ТВ-вещания при проведении симуляционного моделирования

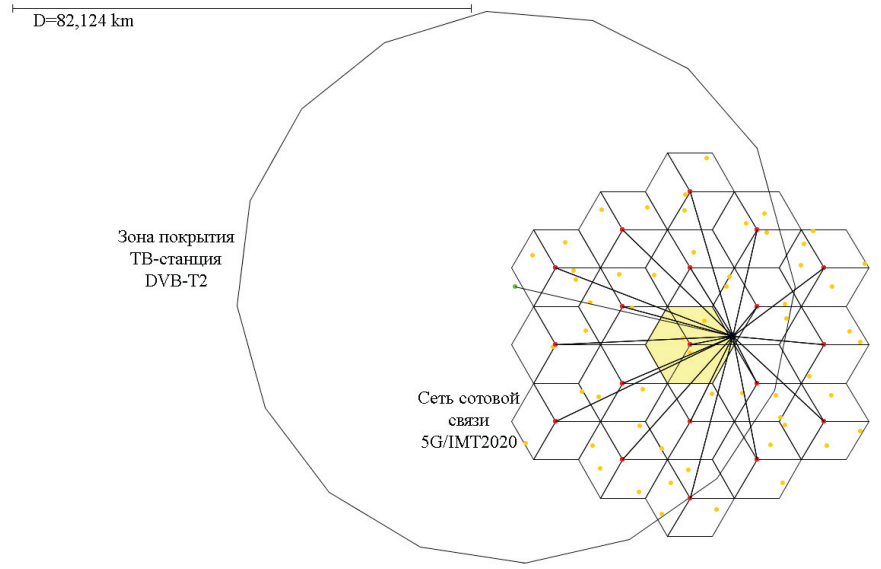
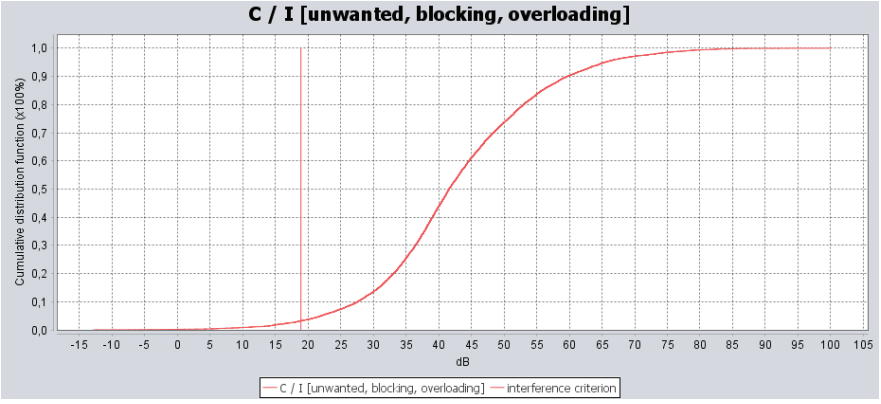


Рисунок 4
CDF помехового воздействия на приёмники ТВ-вещания



качестве одного из методов снижения уровня помехового сигнала БС может рассматриваться установка диапазонного режекторного фильтра в антенно-фидерный тракт приемника ТВ вещания.

Таким образом, по результатам моделирования с использованием метода Монте-Карло также подтверждено потенциальное помеховое влияние сигналов БС стандарта 5G/IMT2020 на качество приема ТВ-сигнала в диапазоне радиочастот 470–694 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация второго цифрового дивиденда в полосе радиочастот 694–790 МГц должна проводится при соблюдении условий ЭМС между радиовещательной и сухопутной подвижной службой. Под условиями обеспечения электромагнитной совместимости в первую очередь понимается обеспечение необходимого частотного разноса между сетями ТВ-вещания и мобильной связи, функционирующих в одном территориальном районе. Эффективность использования спектра будет определяться минимальным частотно-территориальным разнесением РЭС, определяемых критериями ЭМС.

Для сценариев воздействия помех со стороны базовых станций стандарта 5G/IMT2020 на телевизионные приемники используются защитные отношения и пороги перегрузки. По результатам лабораторных испытаний были уточнены значения данных критериев для перспективного варианта использования сетей мобильной связи в полосах радиочастот 703–733/758–788 МГц.

Наиболее критичным с точки зрения обеспечения условий ЭМС является сценарий потенциального помехового воздействия базовых станций на телевизионные приемники. Порог перегрузки, при котором происходит блокировка ТВ-приставки, составляет около –3 дБ.

Для минимизации потенциального помехового воздействия БС должны либо располагаться на защитном расстоянии от зон жилой застройки, в пределах которых осуществляется прием сигналов цифрового наземного эфирного вещания в стандарте DVB-T2, либо излучать с пониженной мощностью в пределах этих зон.

В случае возникновения помех приему программ ТВ вещания от помехового воздействия БС можно рекомендовать следующие организационно-технические мероприятия, осуществляемые на стороне ТВ абонента:

- изменить место размещения приемной антенны так, чтобы минимизировать затенение от локальных препятствий (например деревьев, воздушных линий электропередачи и т.п. объектов) в направлении на РЭС телевизионного вещания;
- в случае перегрузки входного тракта ТВ приемника по возможности обеспечить больший территориальный разнос приемной

ТВ антенны относительно места размещения БС;

- если основное излучение сектора БС направлено на приемную ТВ антенну, т.е. БС расположена на линии между РЭС телевизионного вещания и приемной ТВ антенной, то изменить пространственную ориентацию приемной ТВ антенны в горизонтальной плоскости на несколько градусов и/или изменить высоту подвеса с целью ослабления помехового сигнала БС;
- ввести в антенно-фидерный тракт приемной ТВ установки диапазонный режекторный фильтр с высоким коэффициентом подавления в полосе заграждения, обеспечивающий ослабление помехового сигнала БС;
- заменить активную антенну (с усилителем) на пассивную (без усилителя) с повышенным коэффициентом усиления и дополнительной фильтрацией в диапазоне радиочастот выше 790 МГц;
- заменить ТВ приставку на другую модель, обеспечивающую лучшую частотную избирательность по соседним каналам.

Если ни один из приведенных методов не устраняет помех, требуется организовать доставку пакетов ТВ программ альтернативным путем (спутниковое ТВ, IP-телевещание и др.).

Определенные в работе условия совместного использования и критерии ЭМС позволят минимизировать помеховое воздействие между пользователями рассматриваемых радиослужб и обеспечат возможность полномасштабного внедрения перспективных сетей 5G NR в диапазоне частот ниже 1 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решение ГКРЧ от 16.03.2012 № 12-14-07. Об использовании радиоэлектронными средствами цифрового эфирного телевизионного вещания стандарта DVB-T2 полос радиочастот 174–230 МГц и 470–790 МГц.

2. Указ президента Российской Федерации от 11.08.2014 № 561. О гарантиях распространения телеканалов и радиоканалов на территории Российской Федерации.

3. Захаров, А.А. Перспективы использования цифрового дивиденда 694–790 МГц / А.А. Захаров, Е.Е. Девяткин, А.А. Моченов // Электросвязь. – 2024. – № 6. – С. 5-9.

4. Отчет МСЭ-Р BT.2337 «Исследования совместного использования и совместимости между цифровым наземным телевизионным вещанием и применениями наземной широкополосной подвижной связи, включая IMT, в полосе частот 470-694/698 МГц». – Женева: МСЭ, 2014.

5. Отчет МСЭ-Р BT.2339 «Исследования совместного использования и совместимости в совмещенном канале между цифровым наземным телевизионным вещанием и международной подвижной связью в полосе частот 694–790 МГц в зоне планирования Соглашения «Женева-06». – Женева: МСЭ, 2014.

6. ETSI TS 136 104 V18.6.0 (2025-01). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 18.6.0 Release 18).

7. ETSI TS 138 104 V16.7.0 (2021-04). 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 16.7.0 Release 16).

8. Методика расчетов электромагнитной совместимости и условий совместного использования радиоэлектронных средств телевизионного вещания с радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы в полосе частот 470-862 МГц. Утверждена решением ГКРЧ от 23.11.2020 № 20-56-02-1.

9. Рекомендация МСЭ-R BT.1368-13 (06/2017). Критерии планирования, включая защитные отношения, для услуг наземного цифрового телевидения в диапазонах ОВЧ/УВЧ.

10. Рекомендация МСЭ-R BT.2033-1 (02/2015). Критерии планирования, включая защитные отношения, для систем цифрового наземного телевизионного вещания второго поколения в диапазонах ОВЧ/УВЧ.

11. Моченов, А.А. Помехоустойчивость, защитные отношения и пороги перегрузки систем ТВ-вещания при помеховом воздействии сетей LTE-450 / А.А. Моченов // Электросвязь. – 2022. – № 8. – С. 25-31.

12. Специальное программное обеспечение SEAMCAT. – https://cept.org/eco/eco-tools-and-services/.

13. Захаров, А.А. Текущее состояние и перспективы развития автоматизированных технологий планирования и анализа радиосетей / А.А. Захаров, В.А. Скляров, А.А. Моченов, Е.Г. Руденкова // Труды НИИР. – 2023. – № 3-4. – С. 2-12.

14. ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08). Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).

15. Высочин, В.П. Совместное использование частотного ресурса для развития сетей 5G в диапазоне 700 МГц / В.П. Высочин // Электросвязь. – 2019. – № 7. – С. 23-27.

Получено 10.04.2026;
принято к печати 16.04.2026

Determination of the conditions for providing EMC for TV broadcasting and 5G/IMT-2020 (NR) networks in the frequency range below 1 GHz

A.A. Mochenov, The M.I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication (NRCT), deputy head of department; mochenovaa@nic-t.ru

Abstract. The results of laboratory studies on determining protection ratios and overload thresholds for DVB-T2 digital TV broadcast receivers under interference from signals from base stations and user equipment 5G/IMT-2020 (NR) below 1 GHz are presented. The EMC conditions were modeled for the scenario of shared utilization of TV broadcasting and base stations 5G/IMT-2020 (NR) in adjacent frequency bands based on the Monte Carlo method.

Keywords: digital dividend, EMC, frequency-territorial separation, protection ratios, overload threshold, simulation, DVB-T2, 5G/IMT-2020 (NR).

For citation: Mochenov, A.A. Determination of the conditions for providing EMC for TV broadcasting and 5G/IMT-2020 (NR) networks in the frequency range below 1 GHz / A.A. Mochenov // Electrosvyaz. – 2026. – No. 7. – P. 85-92. (in russian)

REFERENCES

1. Decision of the State Commission on Radio Frequencies of 16/03/2012 No. 12-14-07 «On the use of digital terrestrial television broadcasting of the DVB-T2 standard of the radio frequency bands 174-230 MHz and 470-790 MHz». (in russian)

2. Decree of the President of the Russian Federation of 08/11/2014 No. 561 «On guarantees for the distribution of TV channels and radio channels on the territory of the Russian Federation». (in russian)

3. Zakharov, A.A. Prospects of utilising the 694-790 MHz digital dividend / A.A. Zakharov, E.E. Devyatkin, A.A. Mochenov // Electrosvyaz. – 2024. – No. 6. – P. 5-9. (in russian)

4. Report ITU-R BT.2337-1 (11/2017). Sharing and compatibility studies between digital terrestrial television broadcasting and terrestrial mobile broadband applications, including IMT, in the frequency band 470-694/698 MHz.

5. Report ITU-R BT.2339-0 (11/2014). Co-channel sharing and compatibility studies between digital terrestrial television broadcasting and international mobile telecommunication in the frequency band 694-790 MHz in the GE06 planning area.

6. ETSI TS 136 104 V18.6.0 (2025-01). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 18.6.0 Release 18).

7. ETSI TS 138 104 V16.7.0 (2021-04). 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 16.7.0 Release 16).

8. Methodology for assessing electromagnetic compatibility and conditions between television broadcasting and land mobile service in the frequency band 470-862 MHz. Approved by the decision of the State Commission on Radio Frequencies of 23/11/2020 No. 20-56-02-1. (in russian)

9. Recommendation ITU-R BT.1368-13 (06/2017). Planning criteria, including protective relationships, for terrestrial digital television services in the VHF bands.

10. Recommendation ITU-R BT.2033-2 (01/2022). Planning criteria, including protective relationships, for second-generation digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands.

11. Mochenov, A.A. Noise immunity, protection rations and overload thresholds of TV broadcasting systems under the interference of LTE-450 networks / A.A. Mochenov // Electrosvyaz. – 2022. – No. 8. – P. 25-31. (in russian)

12. Special software SEAMCAT. – https://cept.org/eco/eco-tools-and-services/.

13. Zakharov, A.A. The current state and prospects for the development of automated technologies for planning and analyzing radio networks / A.A. Zakharov, V.A. Sklyarov, A.A. Mochenov, E.G. Rudenkova // Trudy NIIR. – 2023. – No. 3-4. – P. 2-11. (in russian)

14. ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08). Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).

15. Vysochin, V.P. The problems of frequency resource sharing for 700 MHz band of 5G networks / V.P. Vysochin // Electrosvyaz. – 2019. – No. 7. – P. 23-27. (in russian)

ЭС

ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



























elsv.ru

105 064, РОССИЯ,
МОСКВА, УЛ. КАЗАКОВА, 16

+7 (495) 647-17-77

INFO@ELSV.RU

electrosvyazmagazine