

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**СИСТЕМЫ синхронизации,
формирования и обработки
сигналов**

№1-2026 год

Главный редактор

Пестряков Александр Валентинович,

*д.т.н., профессор, зав. кафедрой Радиооборудование и Схемотехника,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Редколлегия:

Дмитриев Александр Сергеевич,

*д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия*

Карякин Владимир Леонидович,

*д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Самара, Россия*

Рыжков Анатолий Васильевич,

*д.т.н., главный научный сотрудник, профессор, Московский технический университет
связи и информатики, Москва, Россия*

Строганова Елена Петровна,

*д.т.н., профессор, Начальник Испытательной лаборатории средств связи и вещания,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Учредитель:

ООО «ИД Медиа Паблшер»

Номер подписан в печать 15.03.2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Борисов Н.С., Пестряков А.В. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ LORA-КАНАЛА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СВЯЗИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА	4
Кораблев Б.П., Федунцов А.М., Якушин Д.А., Власюк И.В. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ РЕСТАВРАЦИИ АРХИВНЫХ ВИДЕОМАТЕРИАЛОВ С УЧЁТОМ СВЯЗИ АУДИО И ВИДЕО: ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ	20
Короткова В.И., Пшеничников А.П., Ярыгин М.А. МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАДЕРЖЕК ПАКЕТОВ СООБЩЕНИЙ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ УЗЛАХ ДОСТУПА	27
Кухаренко А.С., Чуча Г.Г., Хади Хусейн ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРИБОВИДНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА	38
Мальшев А.И., Чиров Д.С. АНАЛИЗ ТЕХОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ	45
Поборчая Н.Е., Жарких С.А. АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МОМЕНТОВ, РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА И МНК В ЗАДАЧЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА M-QAM НА ФОНЕ ШУМА С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОШИ	50
Сурова М.А., Гадасин Д.В., Комкова М.Г., Родина А.А. ДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ В ГЕТЕРОГЕННЫХ КЛАСТЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОБАЛАНСИРУЮЩИХСЯ ДЕРЕВЬЕВ	63

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ LORA-КАНАЛА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СВЯЗИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА

Борисов Никита Сергеевич

Московский технический университет связи и информатики, студент, Москва, Россия

n.s.borisov@edu.mtuci.ru

Пестряков Александр Валентинович

Московский технический университет связи и информатики, д.т.н., профессор, Москва, Россия

a.v.pestriakov@mtuci.ru

Аннотация

В статье рассматривается имитационная модель радиоканала, разработанная в рамках создания аппаратно-программного комплекса для глобального мониторинга на основе технологии LoRa. Представленная модель позволяет в интерактивном режиме изменять ключевые параметры: настройки модуляции, мощность передатчика, факторы окружающей среды и пространственное расположение устройств. Верификация модели проведена на основе данных реальных полевых испытаний.

Ключевые слова

LoRa, мониторинг, отношение сигнал/шум, Spreading Factor, цифровой двойник, адаптивная регулировка мощности, ESP32, SX1262.

Введение

Современные задачи биологистики и орнитологии требуют глобального мониторинга миграционных путей животных в регионах, где полностью отсутствует традиционная инфраструктура связи. Использование существующих спутниковых систем сопряжено с высокой стоимостью передачи данных и жесткими ограничениями на размер сообщений [1, 6]. В связи с этим возникает необходимость создания автономных, экономичных устройств сбора данных, способных накапливать телеметрию и передавать её на локальную базовую станцию для последующей ретрансляции через спутник [2].

Была спроектирована система мониторинга, состоящая из носимых радиометок, на базе связки микроконтроллера ESP32 и LoRa-трансивера SX1262, и базовой станции, устройства, которое агрегирует данные от множества меток, формирует пакеты данных, совместимом со спутниковой системой Argos, и готовит их к отправке [2-4].

Для успешного проектирования [7, 8] и тестирования [9-13] такой системы необходимо было решить такую важную задачу, как прогнозирование качества радиосвязи в различных и часто непредсказуемых условиях эксплуатации. Проведение полевых испытаний во всех возможных сценариях требует огромных временных и материальных затрат. В связи с этим, была создана имитационная модель, реализованная на языке программирования Python [5] с опорой на данные реальных полевых испытаний, используемой аппаратуры. Это позволяет ускорить процесс разработки, прогнозировать характеристики, анализировать зависимость качества радиоканала, визуализировать процессы.

Архитектура имитационной модели

Главной задачей симуляции является создание цифрового двойника системы «базовая станция - множество радиометок», позволяющего исследовать поведение сети без проведения дорогостоящих и длительных полевых испытаний. Инструмент дает возможность в реальном времени наблюдать, как изменения параметров модуляции, окружающей среды или пространственного расположения устройств влияют на ключевые показатели качества связи: мощность принимаемого сигнала, отношение сигнал/шум, дальность передачи и энергопотребление [2].

Реализованы два основных типа объектов, соответствующих архитектуре реальной системы, описанной в техническом задании: радиометки, каждая из которых обладает уникальным идентификатором, координатами, высотой подвеса, температурой и уровнем активности, и базовая станция с настраиваемыми радиусом покрытия и высотой подвеса, расположенная на фиксированной точке пространства.

Ключевой особенностью симулятора является его высокая параметризуемость. Пользователь может гибко настраивать модель через интерфейс, разделенный на логические блоки.

Верификация модели и эксперименты

При разработке симулятора был использован подход, сочетающий теоретические основы распространения радиоволн с эмпирическими данными. Основой для построения модели послужил регрессионный анализ данных, полученных в ходе реальных полевых испытаний прототипов, в ходе которых производились замеры уровня сигнала и отношения сигнал/шум. Полученные данные были математически обработаны и заложены в симулятор в виде весовых коэффициентов и формул, что позволяет основным функциям кода для расчета учитывать не только расстояние, но и поправочные коэффициенты для каждого типа рельефа местности и погоды, генерируя данные, максимально приближенные к реальности.

Для демонстрации работы модели был проведен ряд экспериментов, в ходе которых менялся один ключевой параметр при фиксированных остальных, что позволяет выделить его индивидуальный вклад в общую картину распространения сигнала.

Влияние погодных условий

Метки расположены на фиксированном расстоянии от базовой станции (рис. 1), рельеф – равнина, параметр модуляции LoRa-трансивера (фактор расширения спектра SF) [3,4], влияющий на помехоустойчивость $SF = 12$, погодные условия меняются от ясной погоды до грозы. Основные результаты отражены на рис. 2-7.

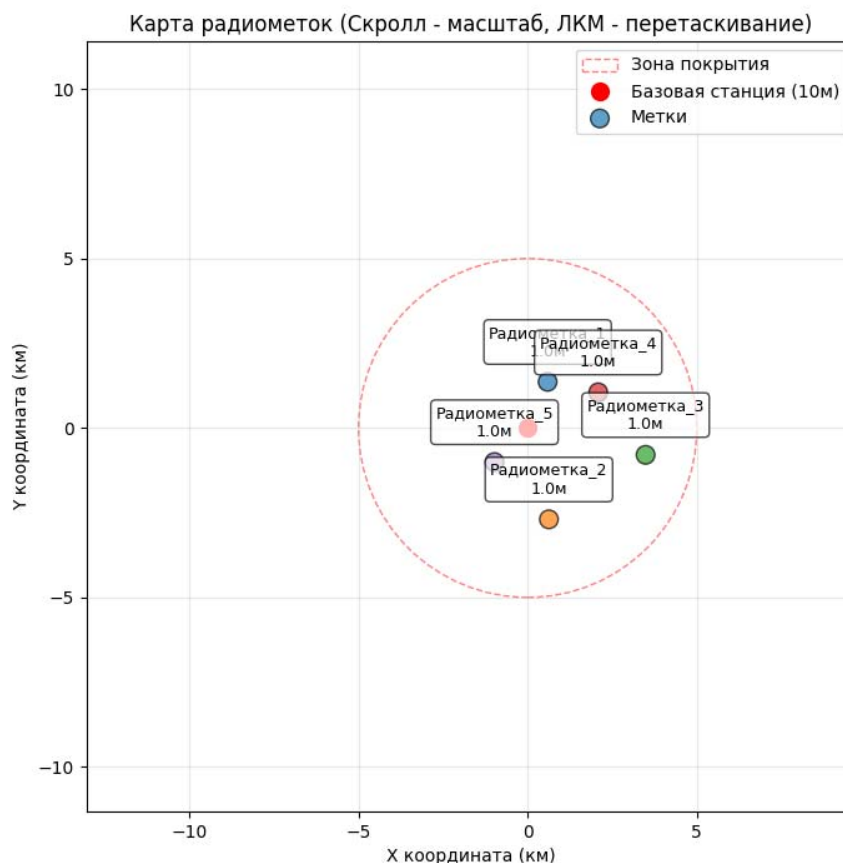


Рис. 1. Размещение меток на карте

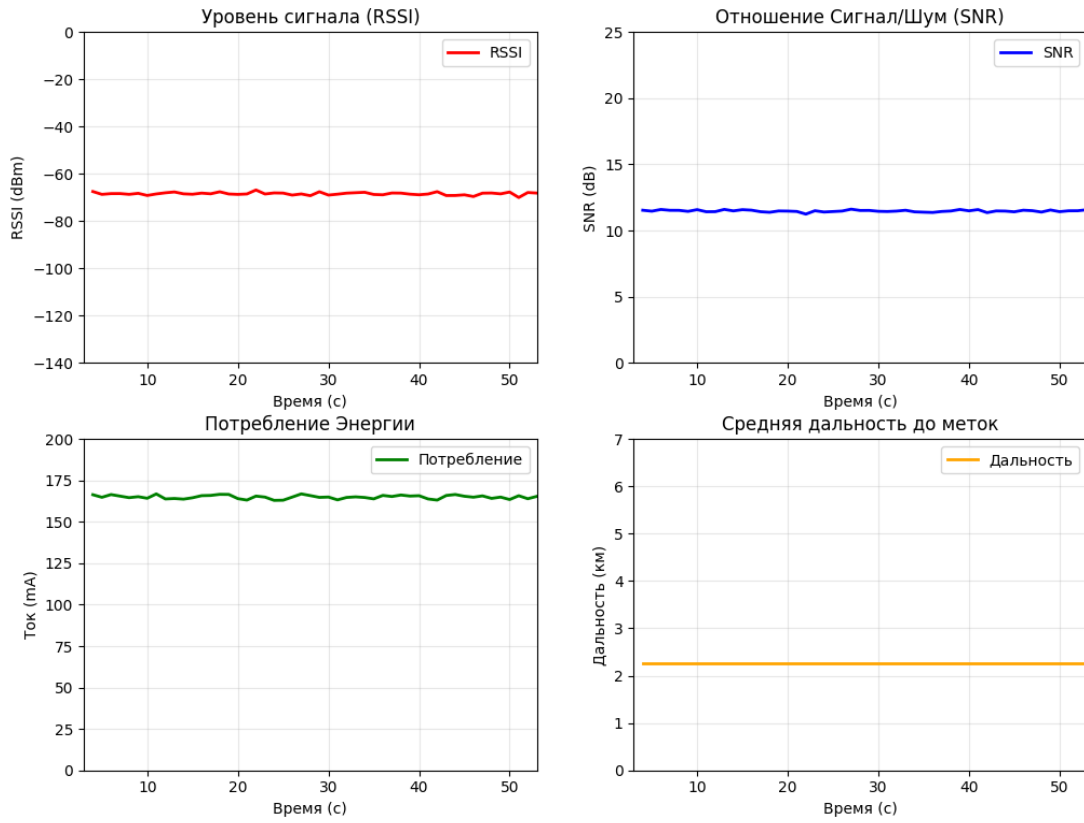


Рис. 2. Параметры при ясной погоде

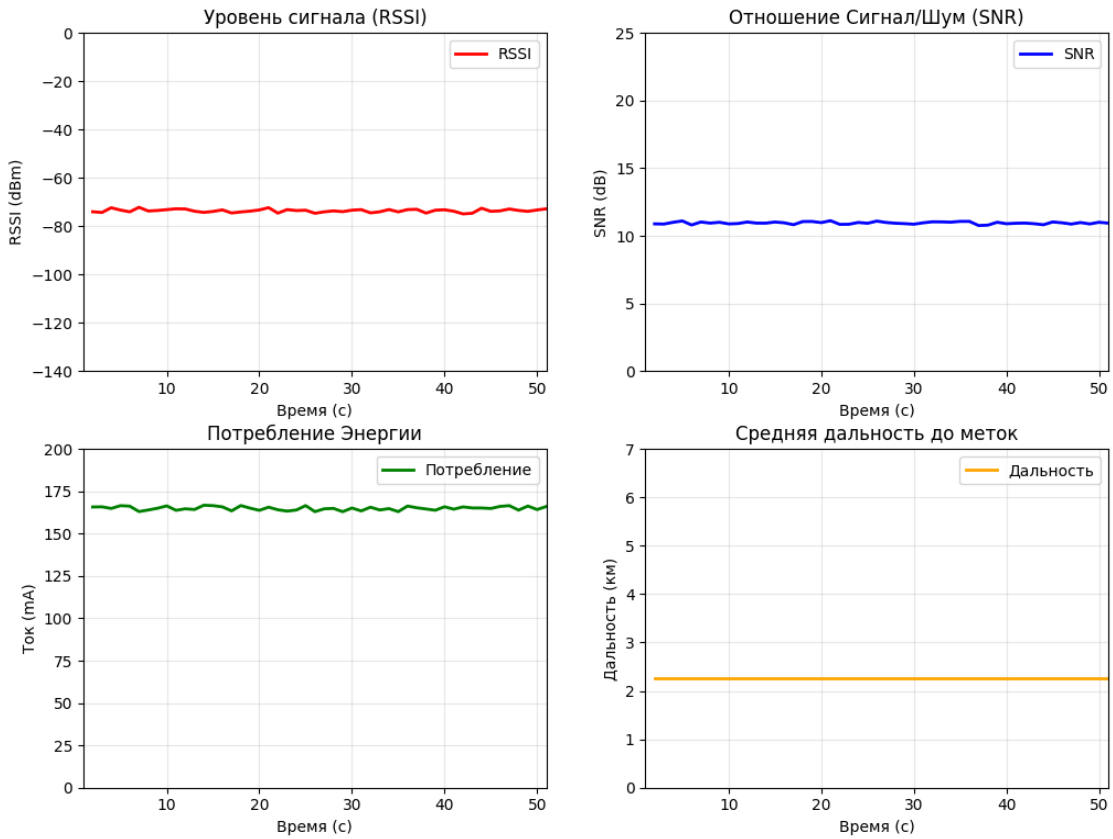


Рис. 3. Параметры при облачной погоде

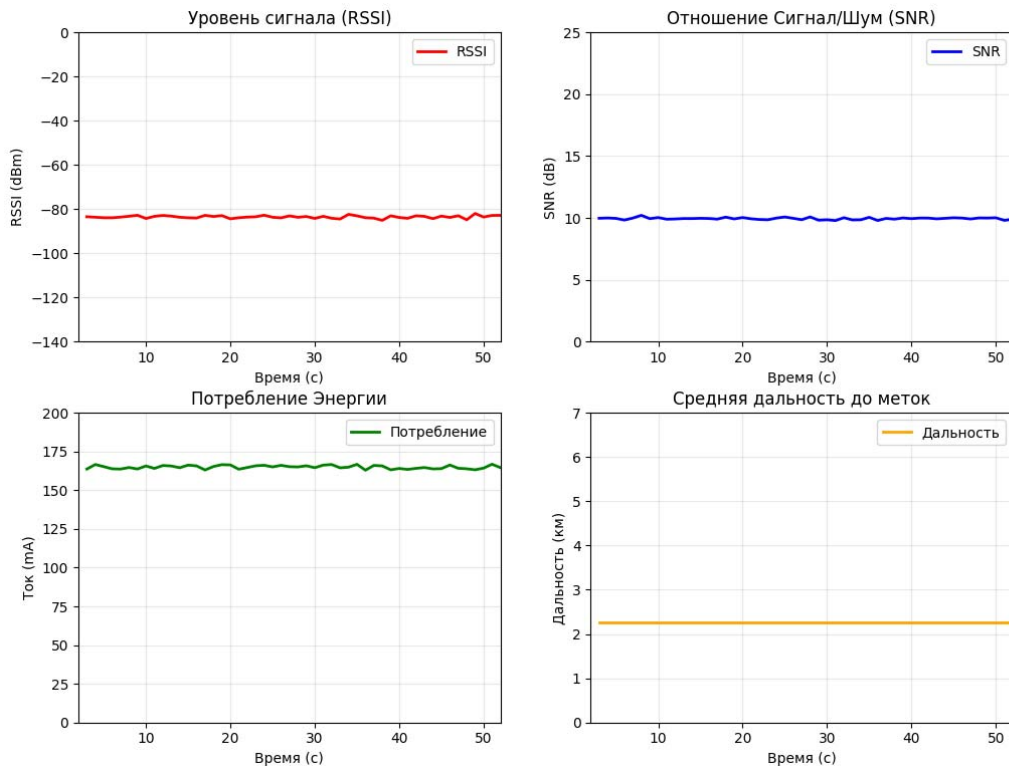


Рис. 4. Параметры во время дождя

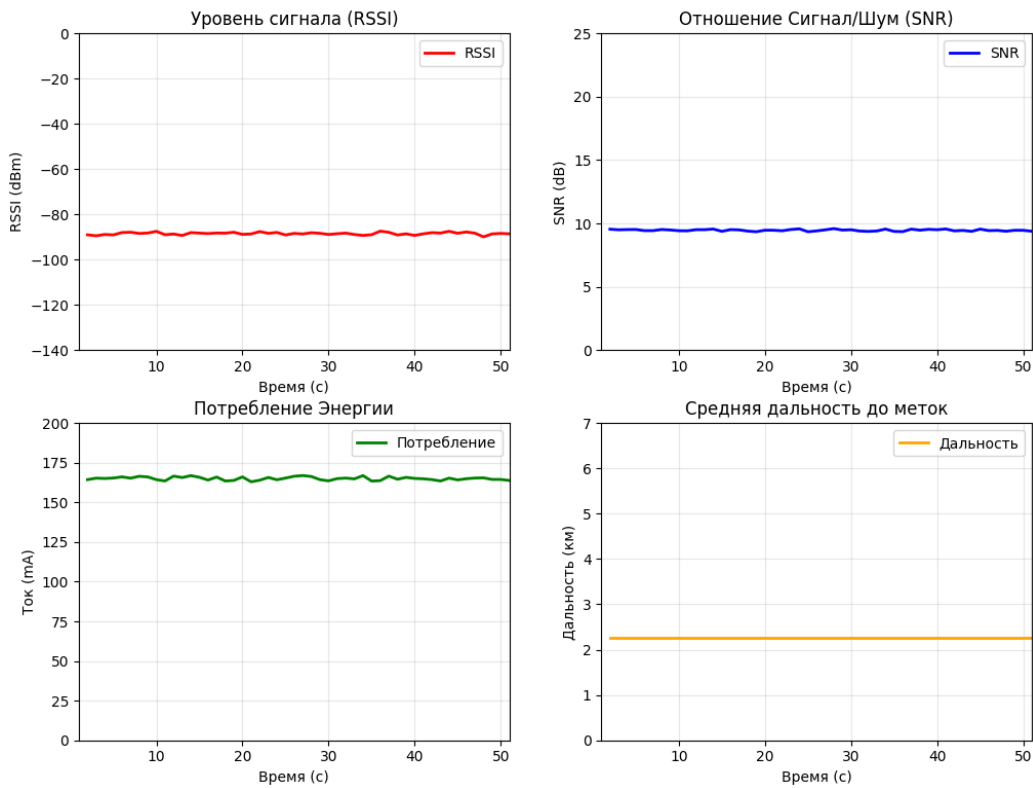


Рис. 5. Параметры во время снега

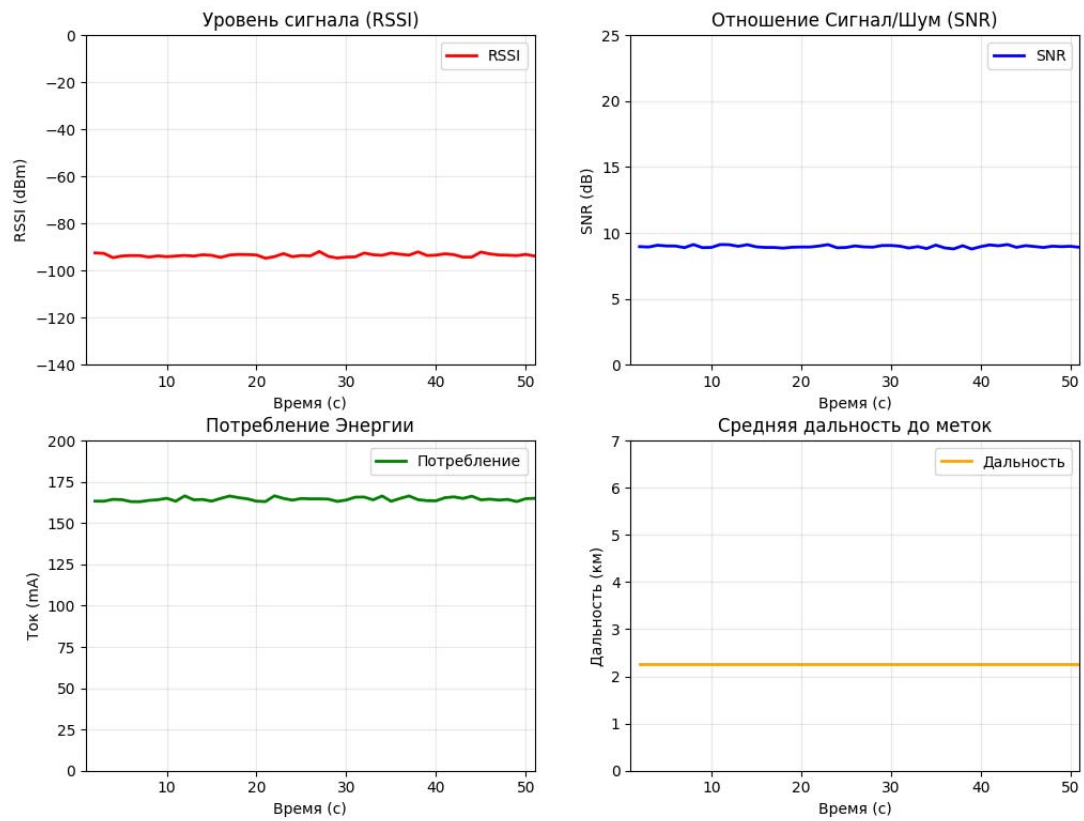


Рис. 6. Параметры во время тумана

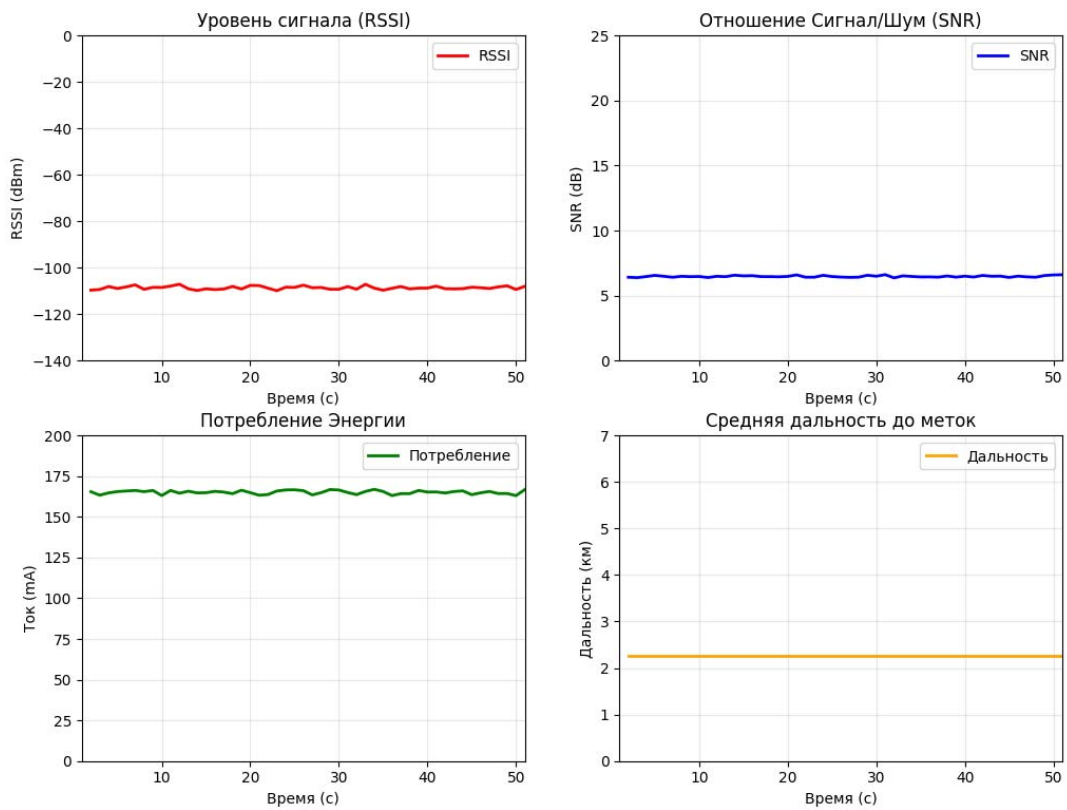


Рис. 7. Параметры во время грозы

Исходя из результатов эксперимента можно сделать вывод, что лучшие показатели система демонстрирует при ясной и облачной погоде (рис. 2, 3), когда ослабление сигнала незначительно. Заметная деградация характеристик видна при осадках и тумане, а во время грозы уровень затухания и импульсных помех достигает критических значений.

Влияние рельефа местности

Установлена ясная погода, SF = 12, метки расположены на таком же расстоянии, что и в прошлом эксперименте. Результаты моделирование представлены на рис. 8-12.

На основании проведённого моделирования можно сделать следующие выводы. Равнина представляет собой эталонные условия для распространения радиоволн, сигнал распространяется предсказуемо, затухание минимально и соответствует теоретическим моделям для свободного пространства, что обеспечивает максимальную дальность связи при прочих равных параметрах (рис. 8). Первые существенные помехи появляются на холмистой местности, за естественными возвышенностями формируются зоны нестабильного прием, возникающие из-за эффекта экранирования (рис. 9).

Этот эффект усиливается на горной местности, сигнал экранируется не только от массивных горных пород, но и от склонов, создавая эффект многолучевого распространения (рис. 10). Лесной массив действует как поглощающая среда. В отличие от гор, где доминирует экранирование, в лесу наблюдается плавное, но существенное ослабление сигнала (рис. 11).

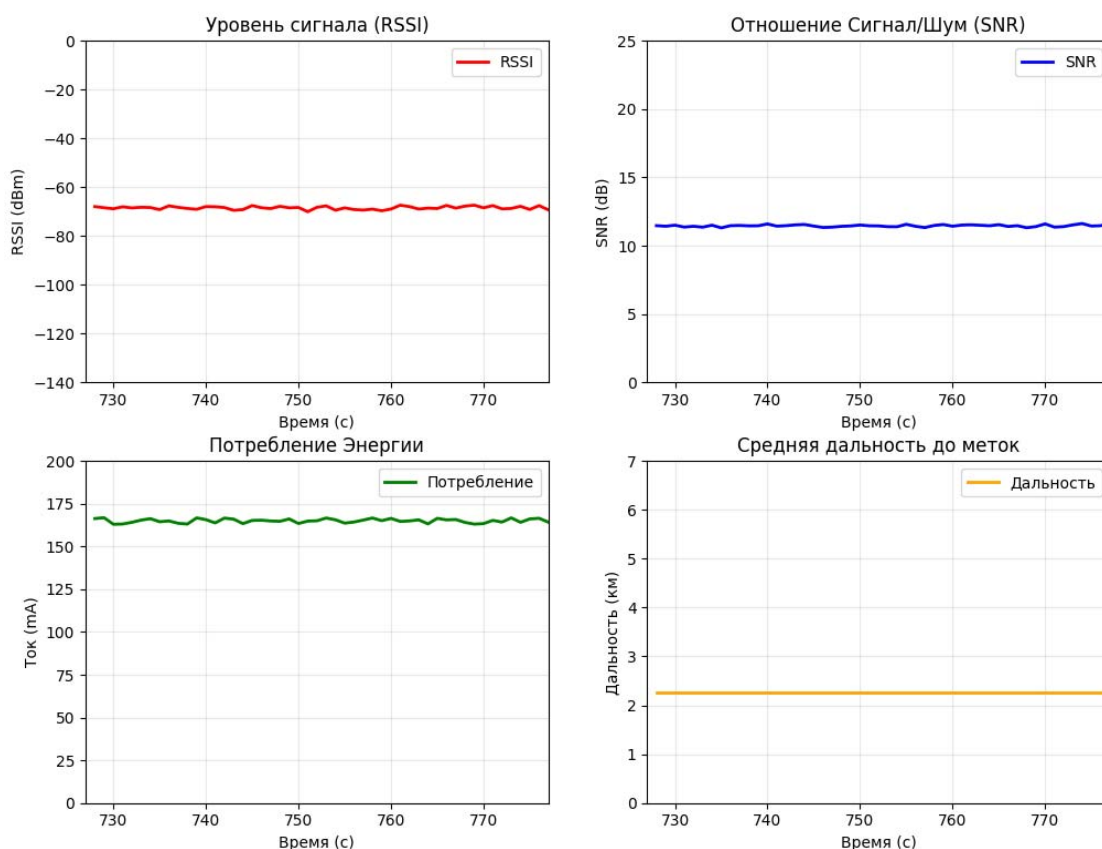


Рис. 8. Параметры на равнине

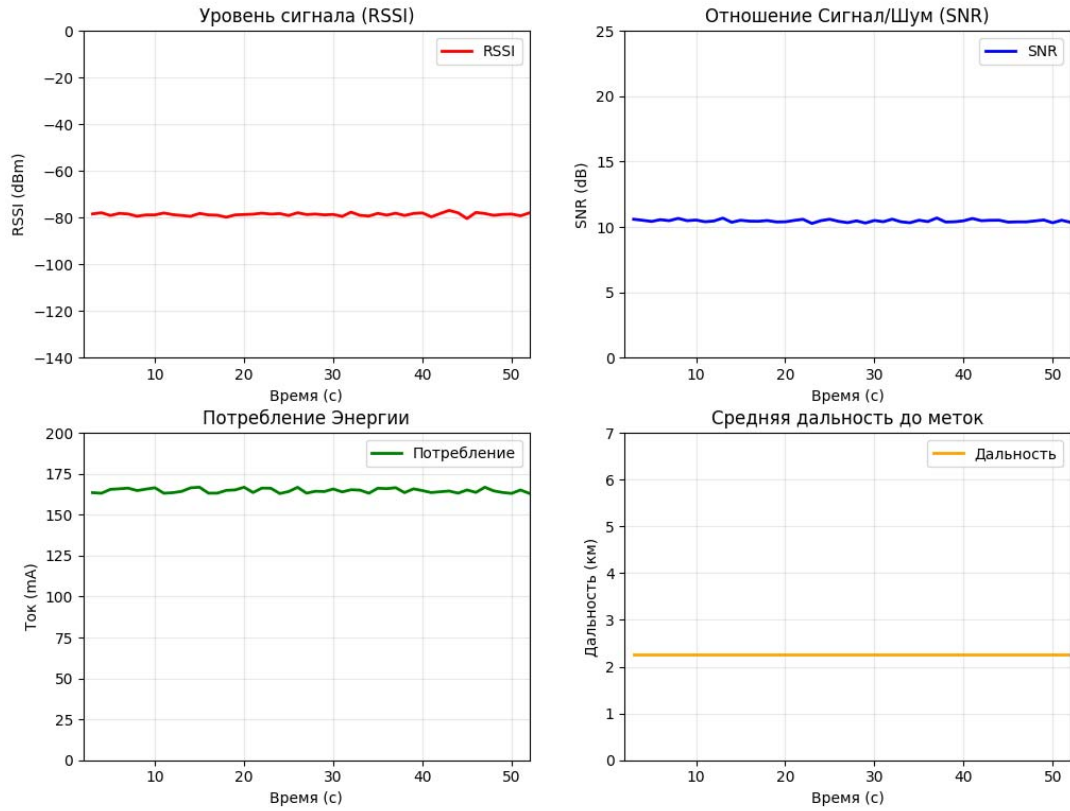


Рис. 9. Параметры на холмистой местности

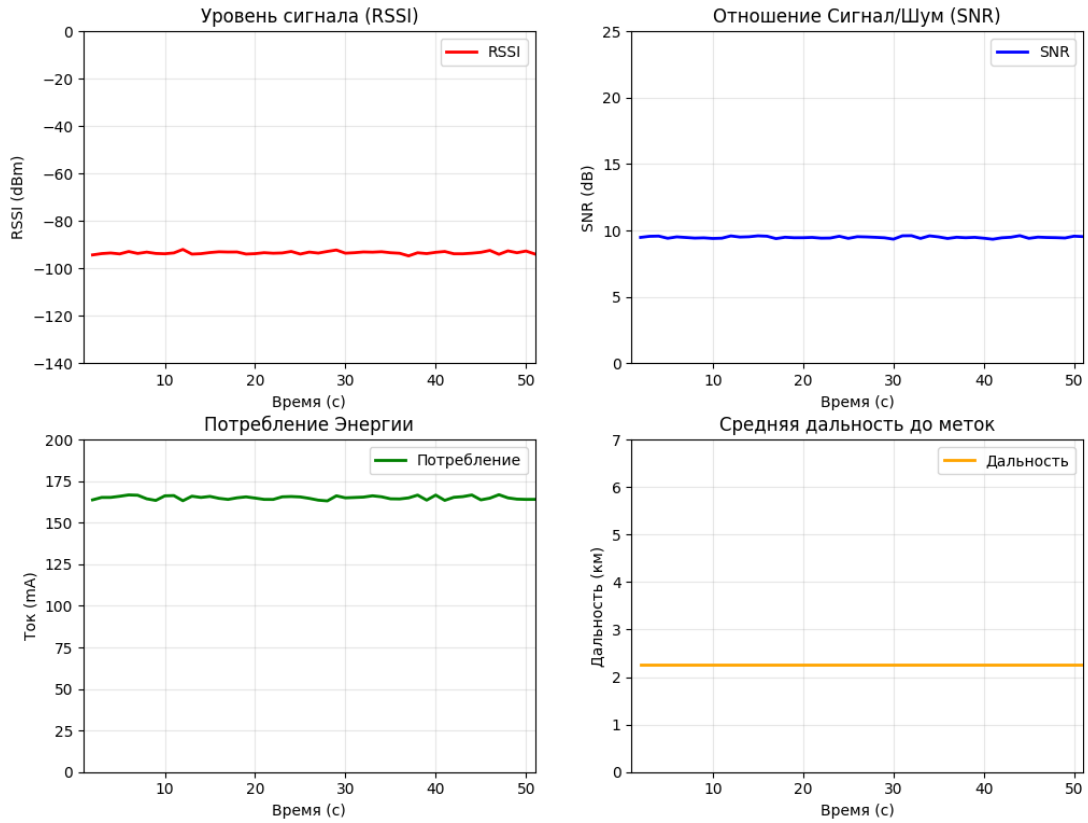


Рис. 10. Параметры на горной местности

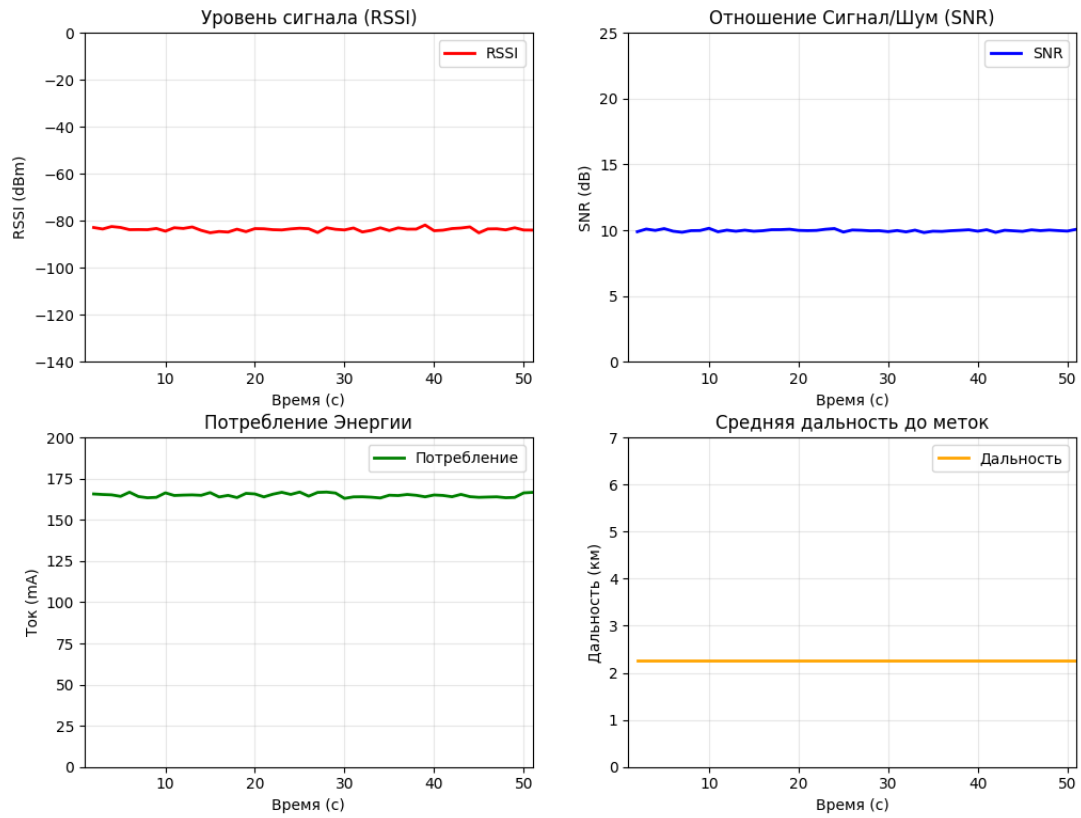


Рис. 11. Параметры в лесу

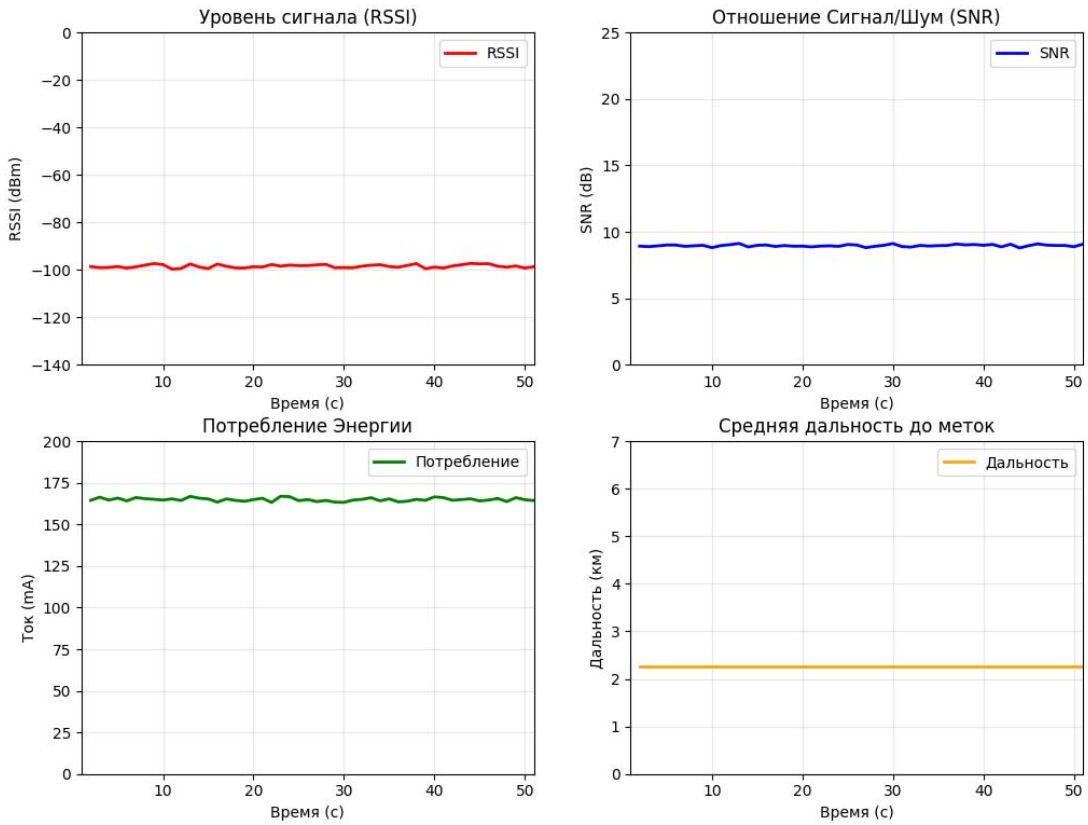


Рис. 12. Параметры в городской застройке

Самый сложный сценарий представляет городская застройка (рис. 12). Мощные железобетонные сооружения приводят к многочисленным переотражениям, что максимально сокращает зону уверенного покрытия.

Влияние фактора расширения спектра (SF)

Проанализируем зависимость показателей системы от SF, так как он оказывает большее влияние. Для этого при прочих равных условиях будем менять SF от 7 до 12. Результаты моделирования представлены на рис. 13-18.

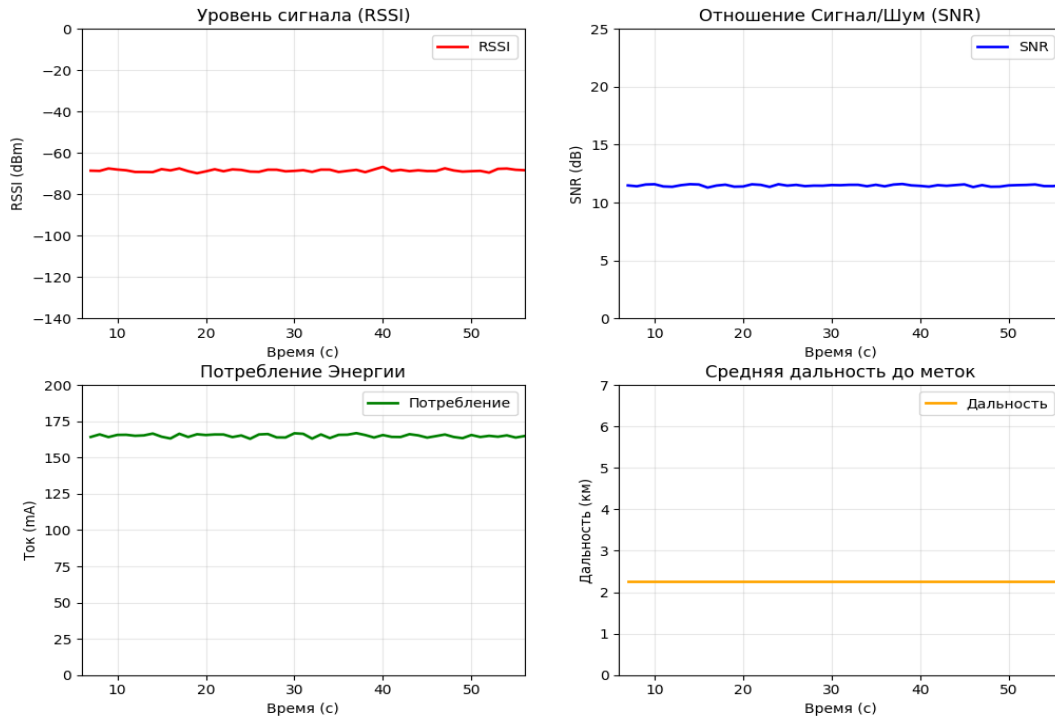


Рис. 13. Параметры при SF = 7

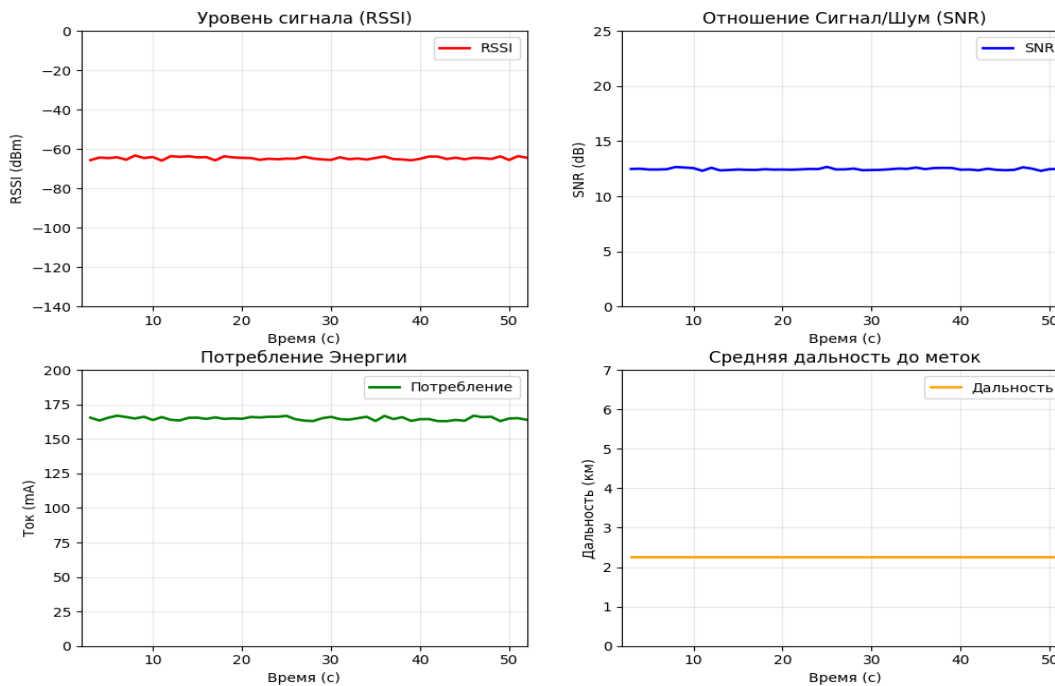


Рис. 14. Параметры при SF = 8

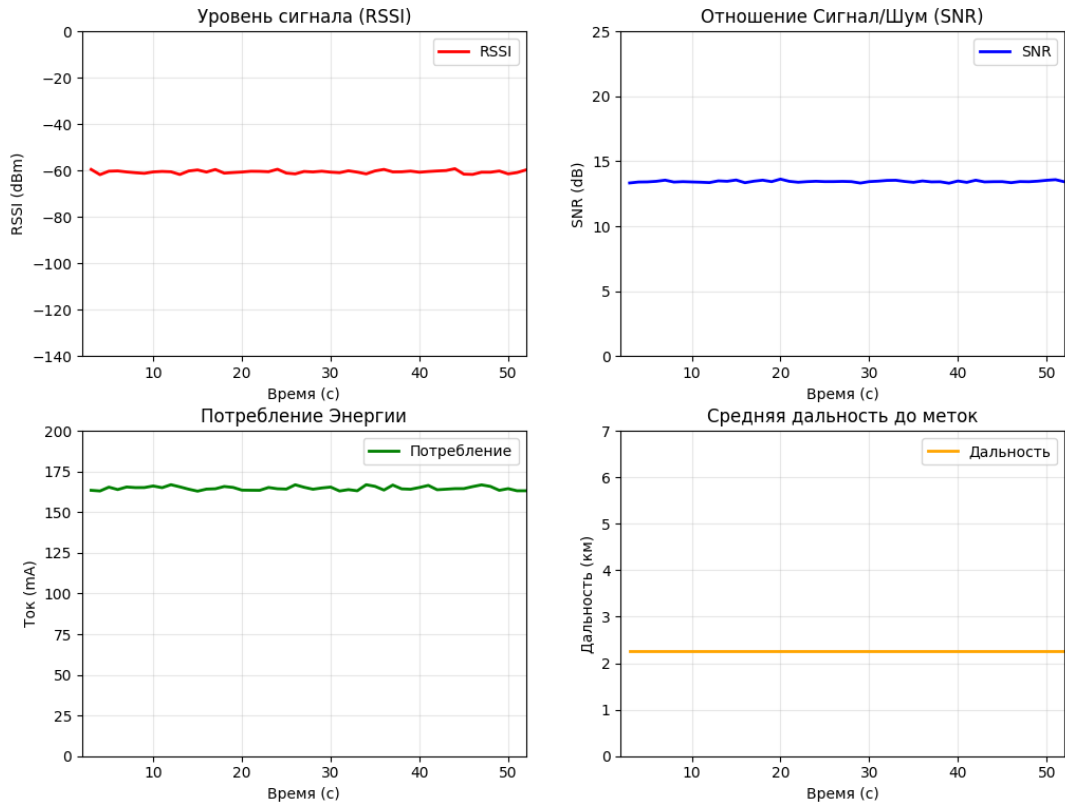


Рис. 15. Параметры при SF = 9

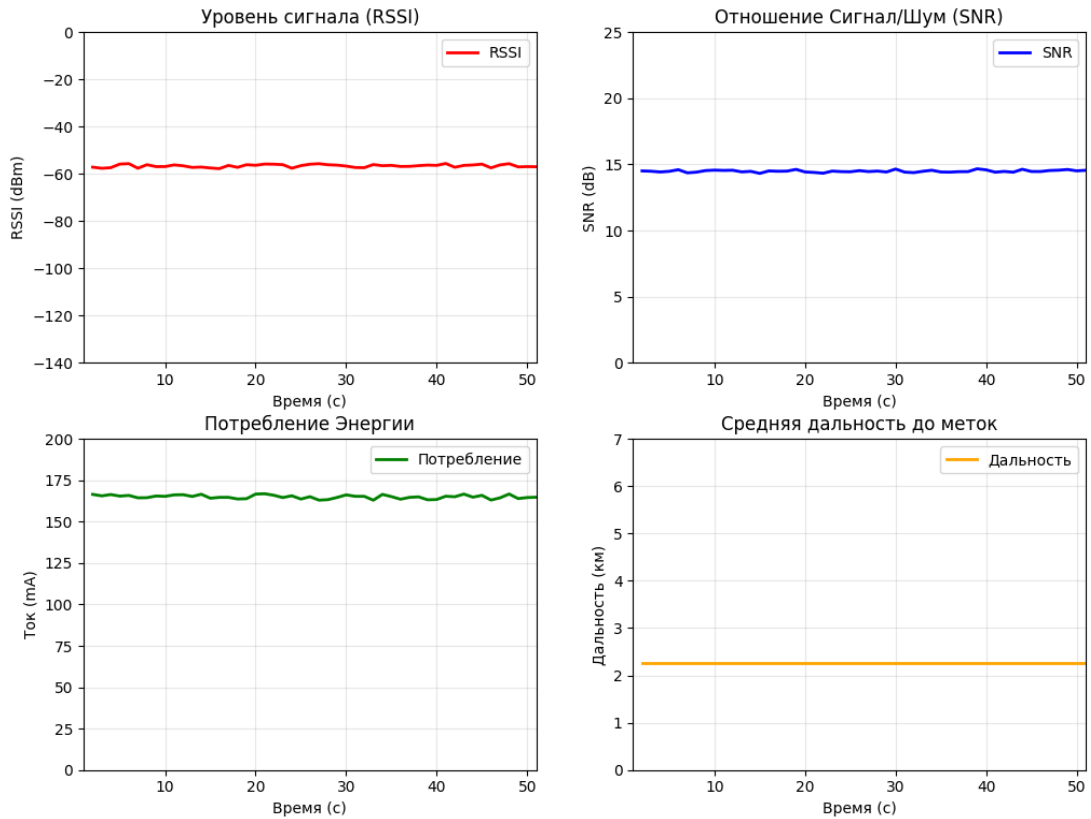


Рис. 16. Параметры при SF = 10

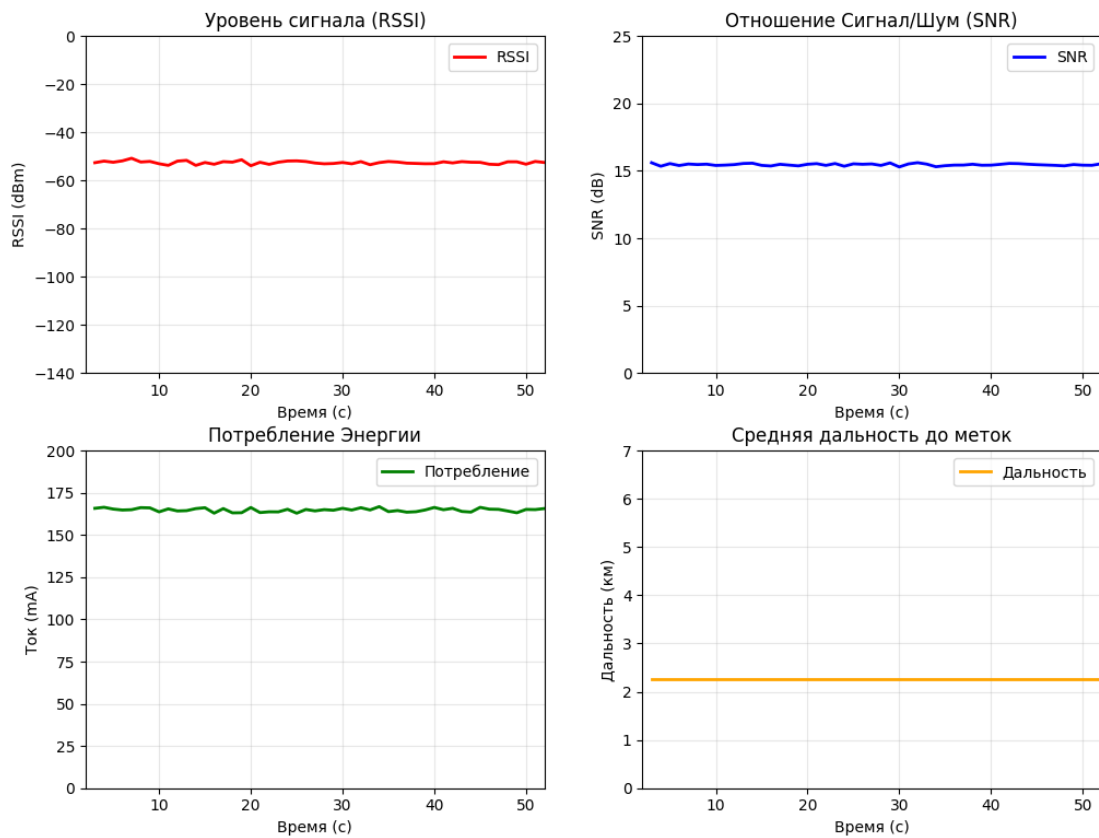


Рис. 17. Параметры при SF = 11

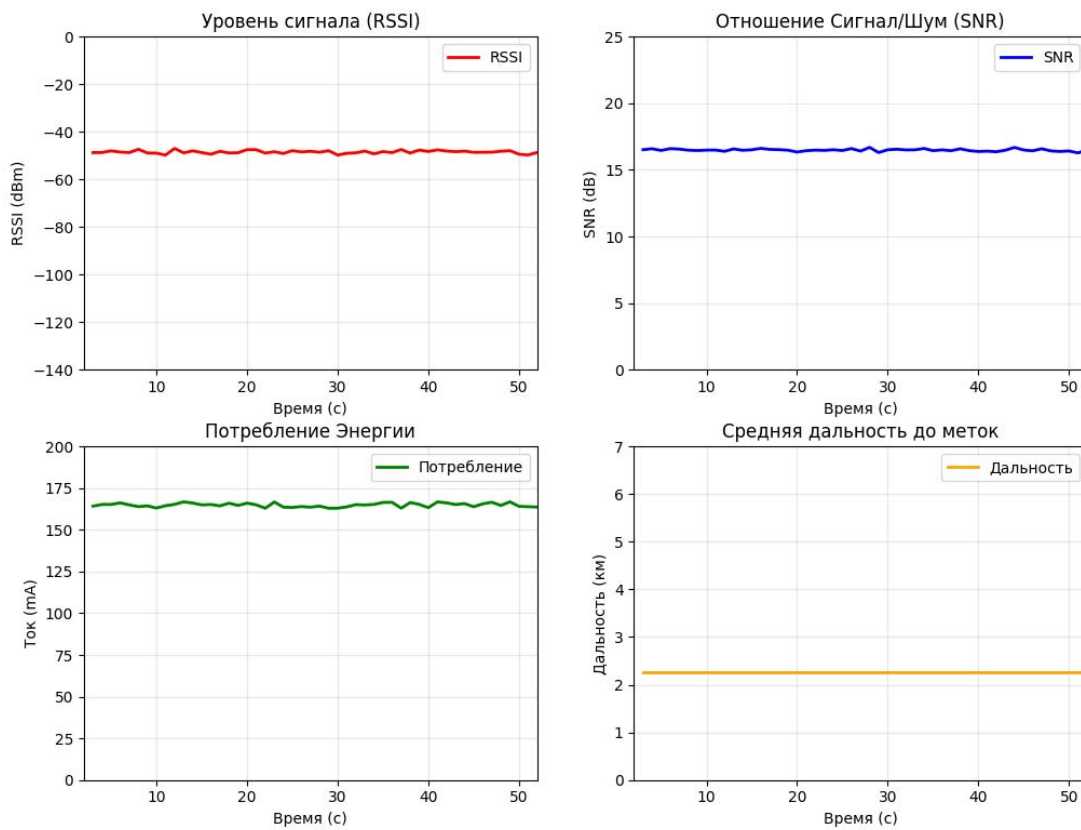


Рис. 18. Параметры при SF = 12

Увеличение SF повышает чувствительность приемника, так как сигнал становится более устойчивым к шумам за счет большей избыточности. Растет также и отношение сигнал/шум. Это позволит реже передавать посылки и тем самым экономить энергоресурс радиометок.

Влияние расстояния от базовой станции до радиометок

Погода ясная, равнина, метки постепенно отдаляются от базовой станции. Результаты представлены на рис. 19-20. Заметно ослабление сигнала и ухудшение отношения сигнал/шум.

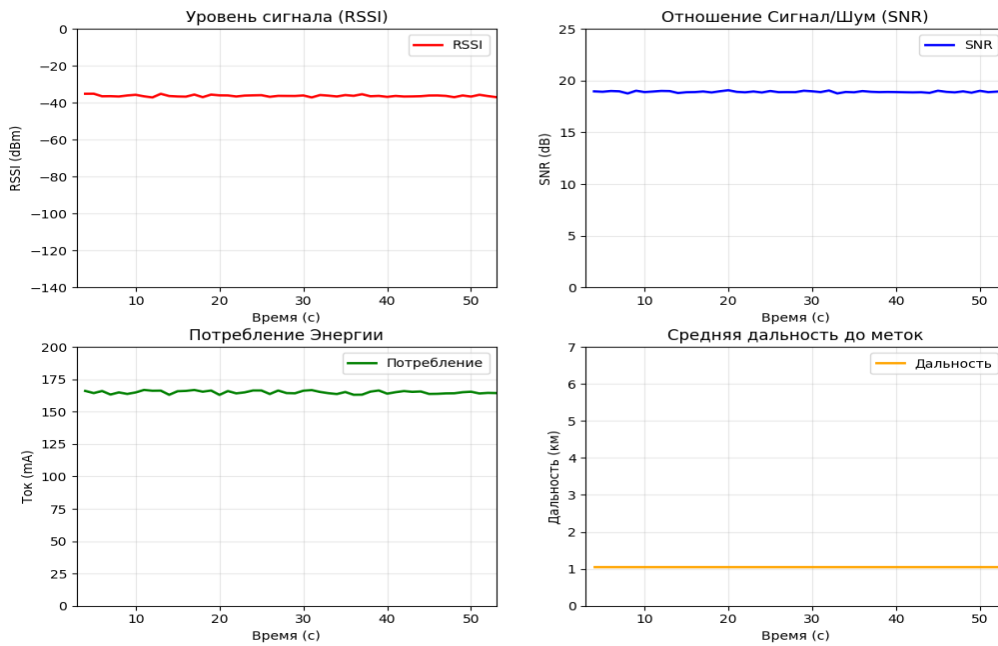


Рис. 19. Параметры при расстоянии 1 км

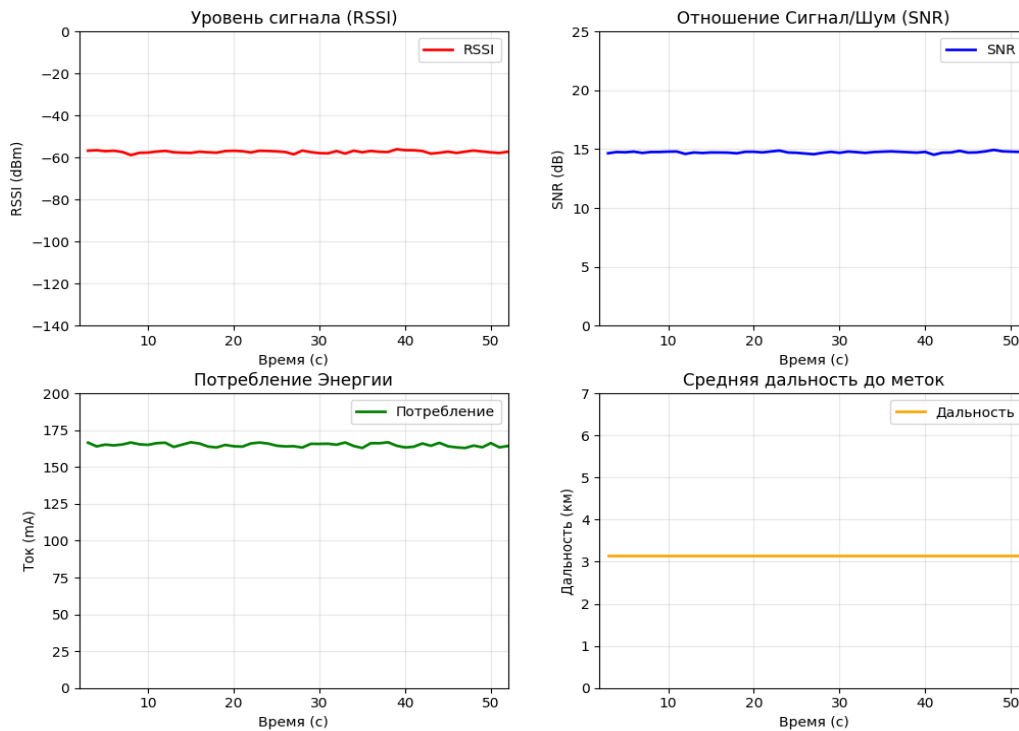


Рис. 20. Параметры при расстоянии 3 км

Также стоит рассмотреть ситуацию, когда все метки покидают зону покрытия базовой станции.

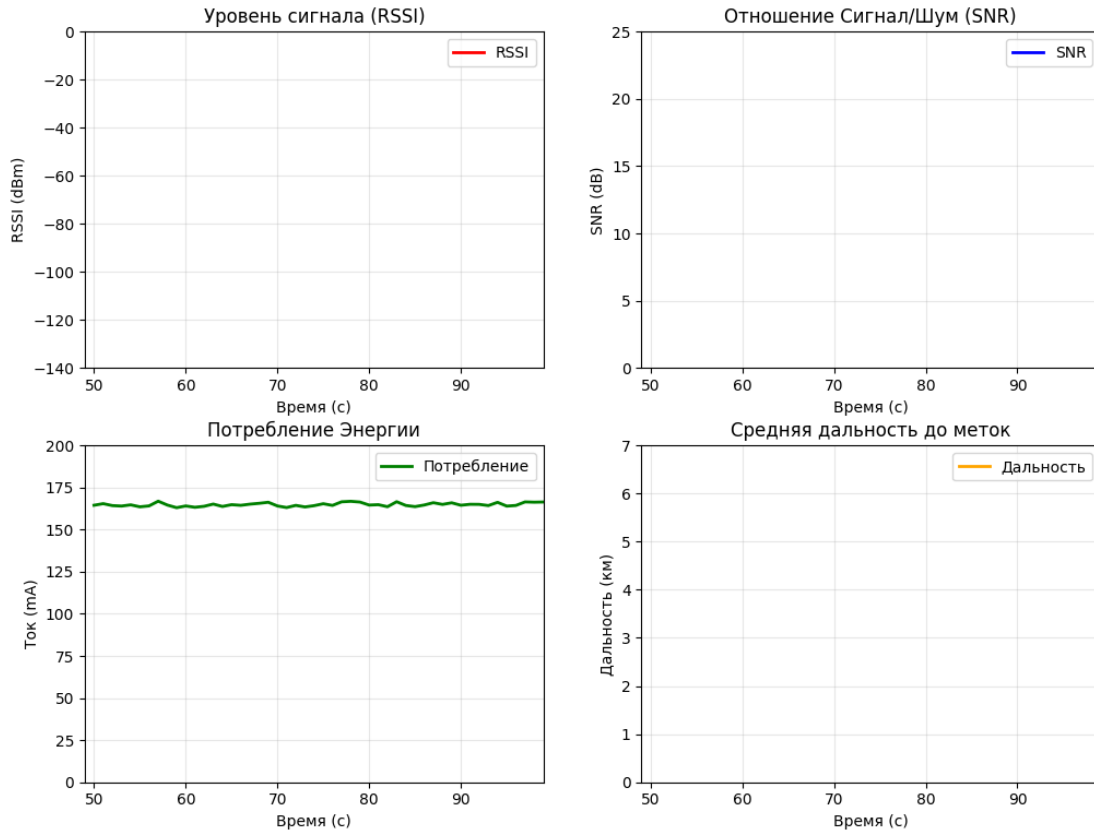


Рис. 21. Параметры при выходе меток из зоны покрытия

В зоне покрытия RSSI и SNR имеют стабильные значения, при подходе к границе зоны начинаются потери пакетов, при выходе за зону покрытия сигнал теряется.

Работа в адаптивном режиме

При включении адаптивного режима мощность передачи начинает меняться в диапазоне от 10 дБм до 22 дБм в зависимости от удаленности метки от базовой станции, что позволяет сохранять уровень RSSI, SNR на одном уровне вне зависимости от расстояния, также это позволяет экономить энергоресурс, когда метки находятся близко к базовой станции.

Разместим метки на границе покрытия базовой станции (рис. 22), в таком случае мощность и энергопотребление будут максимальными (рис. 23).

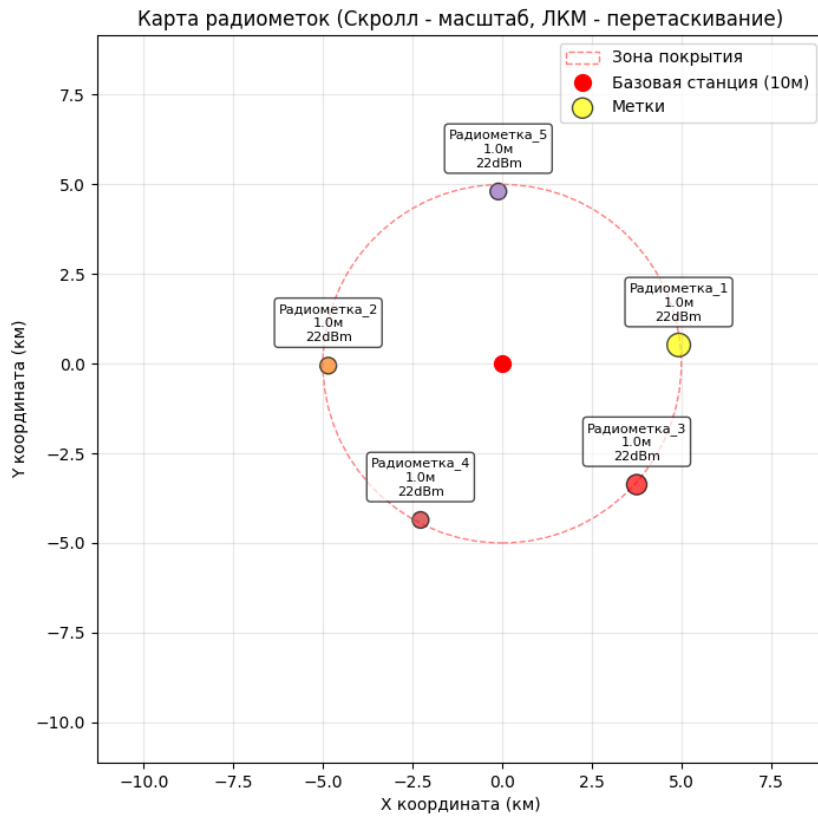


Рис. 22. Расположение на границе зоны покрытия

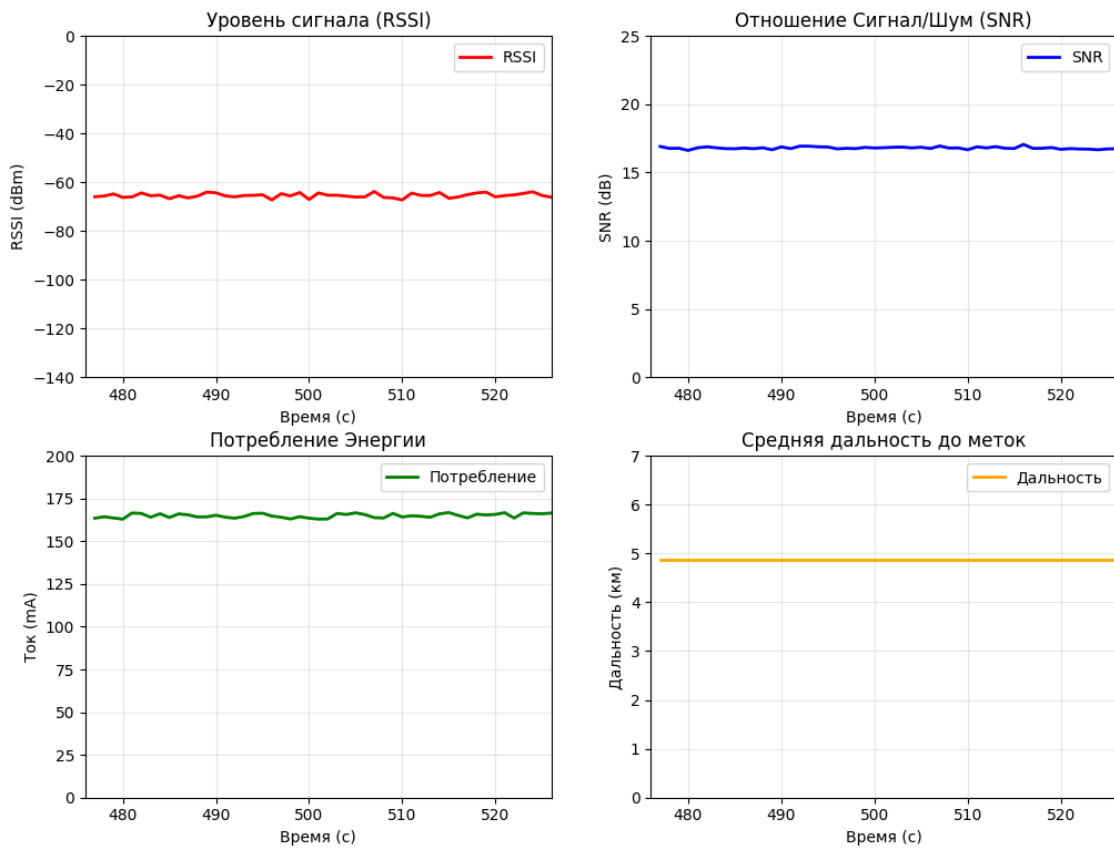


Рис. 23. Показатели на границе зоны покрытия

Однако, показания RSSI и SNR будут достаточно хорошими.

Теперь расположим метки в средней полосе зоны покрытия, мощность передачи снизилась до 15 дБм (рис. 24).

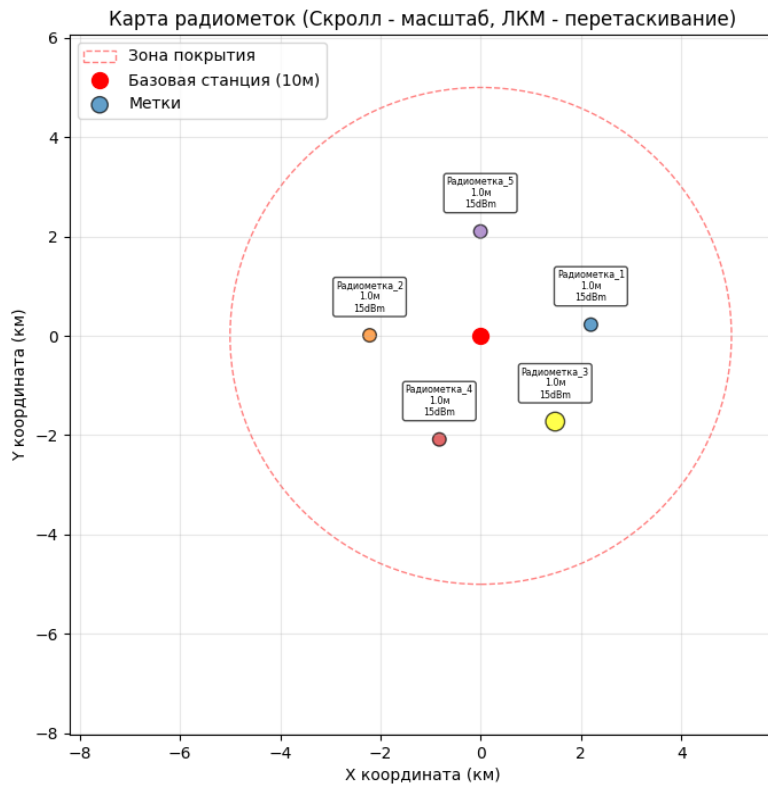


Рис. 24. Расположение рядом с базовой станцией

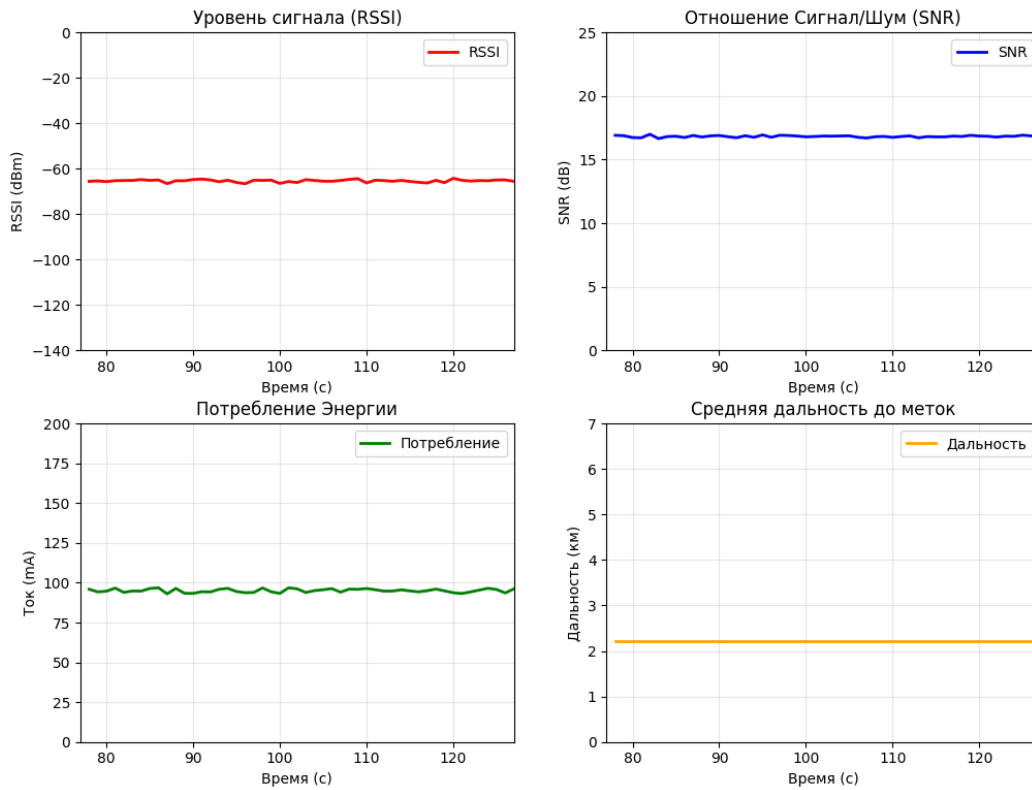


Рис. 25. Показатели рядом с базовой станцией

Уровни RSSI и SNR остались на тех же значениях, за счет снижения мощности и энергопотребления (рис. 25).

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что наибольшее воздействие на способность системы поддерживать связь оказывает SF. Критически важным внешним фактором является наличие препятствий: рельеф, застройка, лес. Они могут вызывать глубокие замирания или полностью блокировать сигнал. Расстояние и погодные условия вносят предсказуемые, но значительные затухания, которые необходимо компенсировать либо увеличением SF, либо повышением мощности передачи.

Заключение

Модель доказала свою эффективность как инструмент анализа и оптимизации, она позволяет задавать широкий спектр параметров и в реальном времени визуализировать результаты на графиках и интерактивной карте местности, что делает ее удобным инструментом не только для разработчиков, но и для специалистов смежных областей.

Проведенные эксперименты подтвердили высокую достоверность модели. Полученные зависимости RSSI и SNR от погодных условий, типа рельефа, дальности и настроек модуляции соответствуют теоретическими представлениями и данным полевых испытаний. Это подтверждает корректность заложенных физических принципов.

Моделирование также подтвердило правильность ключевых технологических решений: выбор связки ESP32+SX1262 обеспечивает требуемую дальность связи даже в сложных условиях; алгоритм адаптивной регулировки мощности эффективно снижает энергопотребление меток в ближней зоне, поддерживая стабильный уровень сигнала; выявленные критические сценарии позволяют повысить надежность системы.

Литература

1. Козлов А.В., Пестряков А.В. Развитие спутниковой системы позиционирования и сбора данных ARGOS // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 2. С. 36-39.
2. Пестряков А.В. Разработка и испытание комбинированной системы глобального мониторинга подвижных объектов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5. № 2. С. 185-195.
3. Furuta Kimiko. Mastering ESP32-Cam from Basics to Advanced Projects. 2025.
4. Kuo C., Tsai P., Tseng X., Liu M. A Study on Infucencible Factors to LoRa LPWAN for monitoring System in Slopes // EGU General Assembly 2025. Vienna, Austria. 2025-EGU25-7.
5. Марк Лутц. Программирование на Python. 4-е издание. Диалектика Вильямс. 2024.
6. Пестряков А. В., Финагина С. А. Анализ требований радиопередающего оборудования для гибридной системы связи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2025. Т. 16, № 1. С. 25-33. EDN GPFJMW.
7. Пестряков А. В., Дымкова С. С. Синхронизация. Итоги 50-ти лет развития в СССР и России // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 11. С. 27-34. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-27-34. EDN SALXGY.
8. Микенин А. Э., Пестряков А. В. Исследование линейной модели кольца компенсации шумов для синтезатора частот // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. Т. 13, № 4. С. 20-26. EDN WTFLDG.
9. Варламов О. В., Пестряков А. В. Лабораторный стенд для исследования радиопередающих устройств с раздельным усилением составляющих модулированного сигнала // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2025. Т. 14, № 2. С. 9-23. EDN AQTGHL.
10. Прокурат Г. А., Микенин А. Э., Пестряков А. В. Разработка интегрированного программного комплекса генерации и анализа цифровых сигналов для лабораторного практикума по дисциплине «Тестирование радиооборудования систем связи» // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2024. Т. 13, № 1. С. 60-65. EDN МОСТЕВ.
11. Миляков М. Б., Пестряков А. В. Разработка измерительного радиоприемника для систем космического мониторинга // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2024. Т. 14, № 3. С. 35-39. EDN KWGCBZ.
12. Микенин А. Э., Прокурат Г. А., Пестряков А. В. Применение векторного анализатора спектра signalhound SM200C при разработке лабораторного практикума по дисциплине "тестирование радиооборудования систем связи" // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2023. Т. 12, № 2. С. 43-49. EDN XBCSRF.
13. Дингес С. И., Пестряков А. В., Хасьянова Е. Р. Тенденции развития и процедуры тестирования оборудования интернета вещей // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2021. Т. 11, № 1. С. 42-53. EDN XQHNWX.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ РЕСТАВРАЦИИ АРХИВНЫХ ВИДЕОМАТЕРИАЛОВ С УЧЁТОМ СВЯЗИ АУДИО И ВИДЕО: ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ

Кораблев Богдан Павлович

Московский Технический Университет Связи и Информатики, студент группы БРА2202, Москва, Россия
bogdan-korablev@mail.ru

Федунов Арсений Михайлович

Московский Технический Университет Связи и Информатики, студент группы БРА2202, Москва, Россия
arsikun@yandex.ru

Якушин Даниил Александрович

Московский Технический Университет Связи и Информатики, студент группы БРА2202, Москва, Россия
DaniilYakushin@mail.ru

Власюк Игорь Викторович

Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия
i.v.vlasiuk@mtuci.ru

Аннотация

Архивные видеоматериалы активно оцифровываются для сохранения и повторного использования, однако повышение визуального качества не всегда сопровождается восстановлением временной структуры видеоряда. На практике процедуры шумоподавления, повышения пространственного разрешения и коррекции контраста часто выполняются без устранения временных искажений, включая выпадение и дублирование кадров, дрейф временной базы (изменение эффективной скорости воспроизведения) и аудиовизуальную рассинхронизацию. При этом звуковая дорожка во многих случаях сохраняет более устойчивую временную организацию событий и может служить опорным сигналом при выравнивании видеоряда и выявлении структурных нарушений во времени. В статье представлен обзор современных методов цифровой реставрации архивного видео с акцентом на подходы, использующие связь аудио и видео: нейросетевой ремастеринг, модели аудиовизуальной синхронизации и системы совместной обработки модальностей. На основе анализа сформулирована постановка задачи восстановления временной структуры архивного видеоматериала на основе аудиовизуальной корреляции и обозначены направления построения универсального офлайн-алгоритма с автоматическим выбором режима согласования для разнородных сцен.

Ключевые слова:

архивные видеоматериалы, цифровая реставрация видео, временная структура видеоряда, межкадровая согласованность, аудиовизуальная рассинхронизация, временное выравнивание, выпадение и дублирование кадров, аудиовизуальная корреляция, глубокое обучение, нейросетевые методы обработки видео.

Введение

В настоящей работе архивные видеоматериалы рассматриваются как аудиовизуальные документы, созданные в предшествующие периоды и представленные в виде оцифрованных копий, предназначенных для хранения, воспроизведения и повторного использования [1]. Для таких данных характерны комплексные деградации, возникающие вследствие физического износа носителя, многократного копирования, особенностей воспроизводящей аппаратуры и процедур оцифровки. Наблюдаемые искажения включают локальные дефекты изображения (царапины, пятна, загрязнения), глобальные деградации (шум, размытость, снижение контраста, артефакты сжатия), а также межкадровые нарушения, приводящие к ухудшению временной согласованности (нестабильность яркостных характеристик) [2, 9, 10-15]. Существенную практическую проблему составляют нарушения временной структуры видеоряда, включая выпадение и дублирование кадров, дрейф временной базы (изменение эффективной скорости воспроизведения) и аудиовизуальную рассинхронизацию, которые непосредственно снижают воспринимаемое качество и затрудняют корректное использование материалов.

Современные системы цифровой реставрации преимущественно ориентированы на повышение визуального качества: подавление шума, восстановление деталей, повышение пространственного разрешения, коррекцию деградаций и обеспечение межкадровой согласованности [9]. Для задач реставрации плёночных

материалов предложены автоматические методы обнаружения и удаления дефектов, использующие структурные признаки и временную избыточность видеоряда [2]. В более поздних нейросетевых решениях акцент смещается к комплексному улучшению видео на основе пространственно-временных представлений и механизмов внимания; характерным примером является подход DeepRemaster, ориентированный на согласованное улучшение последовательности кадров и использование опорных кадров/изображений для повышения качества и восстановления цветовой информации [3, 16-20]. Однако, несмотря на учёт временной согласованности изображения, большинство подобных решений рассматривает видеоряд как основной источник информации и не использует звуковую дорожку для восстановления временной структуры.

Параллельно развивается направление аудиовизуальной синхронизации, в котором связь между звуковыми и визуальными признаками используется для оценки временного соответствия модальностей. Для речевых фрагментов предложены методы, сопоставляющие аудиопризнаки речи с динамикой области рта и позволяющие оценивать рассинхронизацию в реальных условиях [4]. Для более общего случая, включающего разнообразные сцены и типы событий, разработаны модели аудиовизуальной синхронизации, ориентированные на совместный анализ аудио- и видеопредставлений на уровне последовательностей признаков [5, 21-25]. Дополнительный интерес представляют работы, в которых рассматривается совместное улучшение качества видео и аудио, что подчёркивает актуальность межмодальной постановки в задачах реставрации исторических записей [6]. Наконец, развитие задач аудиовизуального восстановления речи и соответствующих бенчмарков демонстрирует практическую реализуемость универсальных мультимодальных схем с разделением на режимы обработки в зависимости от условий сцены [7, 8].

Целью статьи является обзор современных методов цифровой реставрации архивных видеоматериалов с акцентом на подходы, использующие связь аудио и видео, а также формулирование постановки задачи восстановления временной структуры архивного видеоряда на основе аудиовизуальной корреляции. Для достижения цели рассматриваются: (i) типовые классы деградаций архивных аудиовизуальных документов и требования к результату реставрации [1, 9]; (ii) методы визуальной реставрации и ремастеринга, включая алгоритмы обнаружения/устранения дефектов и нейросетевые модели комплексного улучшения видео [2], [3]; (iii) методы аудиовизуальной синхронизации для речевых и общих сцен [4, 5]; (iv) работы по совместной обработке аудио и видео как направление, непосредственно связанное с восстановлением согласованности модальностей [6-8]. На основе анализа выделяются предпосылки и ограничения существующих решений и обосновываются направления построения универсального офлайн-алгоритма коррекции временных искажений, применимого к разнородным типам архивного материала.

Результаты исследований

Архивные видеоматериалы как аудиовизуальные документы представляют собой результат длительного жизненного цикла записи (создание, хранение, воспроизведение, копирование, оцифровка), поэтому их деградации, как правило, носят смешанный характер и одновременно затрагивают изображение, временную структуру видеоряда и синхронность с аудиодорожкой [1].

В рамках обзорной постановки целесообразно разделять искажения на локальные дефекты изображения (царапины, пятна, загрязнения, кратковременные выпадения информации), глобальные деградации (шум, снижение резкости, уменьшение контраста, артефакты компрессии), межкадровые нарушения (нестабильность яркости, дрейф экспозиции), а также нарушения временной структуры и синхронизации, включающие выпадение и дублирование кадров, дрейф временной базы (изменение эффективной скорости воспроизведения) и аудиовизуальную рассинхронизацию [2, 9].

С инженерной точки зрения именно последняя группа дефектов часто определяет воспринимаемое качество, поскольку даже после визуального улучшения видеоряд может оставаться «некорректным во времени»: нарушается ритм движения, ухудшается воспринимаемость действий и речи, а восстановленные детали оказываются нестабильными из-за несогласованности между кадрами.

Классические подходы к реставрации плёночных материалов и ранних видеозаписей строились вокруг идеи обнаружения дефектов и их устранения с использованием пространственной структуры изображения и временной избыточности видеопоследовательности.



Рис. 1. Обобщённая схема автоматической реставрации: обнаружение дефектов и восстановление повреждённых областей

В работе Wang и Mirmehdi предложен автоматический конвейер, включающий обнаружение дефектов и их подавление, что позволяет восстанавливать визуальную целостность видеоряда без ручной разметки повреждений [2]. Достоинством данного класса решений является интерпретируемость процедур обработки и возможность целенаправленной адаптации под конкретные типы дефектов.

Ограничения становятся заметны в условиях сложных смешанных деградаций, когда дефекты сопровождаются существенным шумом, размытостью и межкадровой нестабильностью, а также в ситуациях, требующих явной коррекции временной структуры (выпадения/дубли кадров, дрейф временной базы), поскольку эти искажения не устраняются только локальным восстановлением области изображения.

Современные нейросетевые методы цифровой реставрации развиваются в направлении комплексного улучшения видеоряда с явным учётом пространственно-временной структуры и требований межкадровой согласованности [9]. В этом контексте показателен подход DeepRemaster, ориентированный на комплексное улучшение качества архивного видео и использование опорных кадров/изображений для повышения качества и восстановления цветовой информации [3].

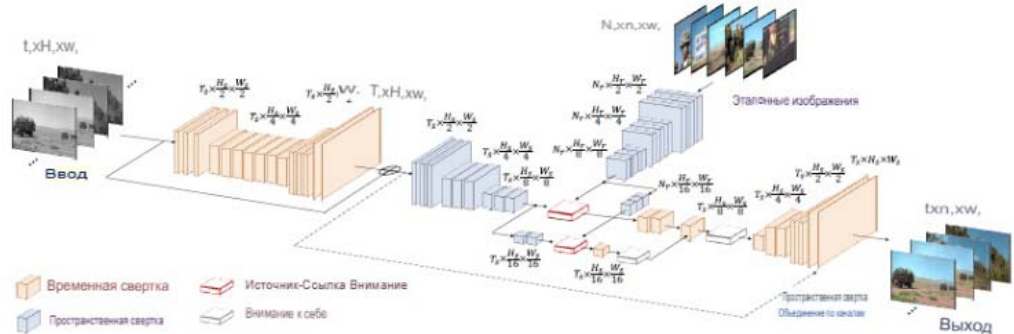


Рис. 2. Общая архитектура DeepRemaster для комплексного улучшения архивного видео с использованием опорных данных

Архитектура использует пространственно-временные признаки и механизм внимания, который обеспечивает перенос информации из опорных данных в обрабатываемую последовательность. В качестве характерного элемента вводится слой source-reference attention, реализующий сопоставление признаков источника и опорных кадров и формирование корректирующей добавки к признакам видеоряда [3].

$$A_{sr}(h_s, h_r) = h_s + \gamma d \left(e_t(h_s) \text{softmax} \left(e_s(h_s, h_r) \right) \right)$$

где h_s и h_r – признаки источника и опорного изображения, $es(\cdot)$, $er(\cdot)$, $et(\cdot)$ – отображения в пространство признаков, $d(\cdot)$ – операция обратного преобразования формы тензора без изменения значений, γ – масштабный коэффициент [3].

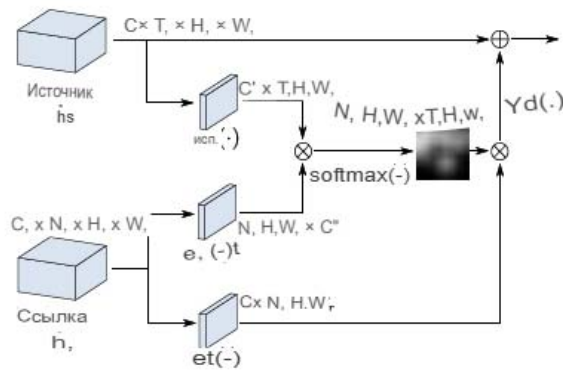


Рис. 3. Слой source-reference attention: сопоставление признаков источника и опорных кадров и перенос информации в обрабатываемую последовательность

Практический смысл подобных моделей состоит в том, что улучшение производится не покадрово, а как обработка согласованной последовательности, что снижает риск межкадровых артефактов и повышает устойчивость к нестабильностям изображения. Вместе с тем типовая цель таких систем — повышение визуального качества (шум, детали, цвет, стабильность изображения), тогда как коррекция временной структуры и устранение аудиовизуальной рассинхронизации обычно не рассматриваются как центральный объект восстановления. Это формирует методический разрыв: визуальная реставрация обеспечивает межкадровую согласованность на уровне изображения, но не гарантирует согласованность временной шкалы и синхронизацию с аудио событиями.

Перспективный путь закрытия данного разрыва связан с использованием аудиовизуальной связи как источника информации о времени. Направление аудиовизуальной синхронизации предлагает формализованные критерии оценки временного соответствия аудио и видео, которые могут быть использованы повторно в задачах восстановления временной структуры. Для речевых фрагментов ключевой является постановка, в которой аудио сопоставляется с динамикой области рта/лица. В работе Chung и Zisserman предложен подход оценки рассинхронизации «в естественных условиях», основанный на формировании эмбеддингов аудио и видео и минимизации расстояния между синхронными парами при одновременном разделении несинхронных [4].

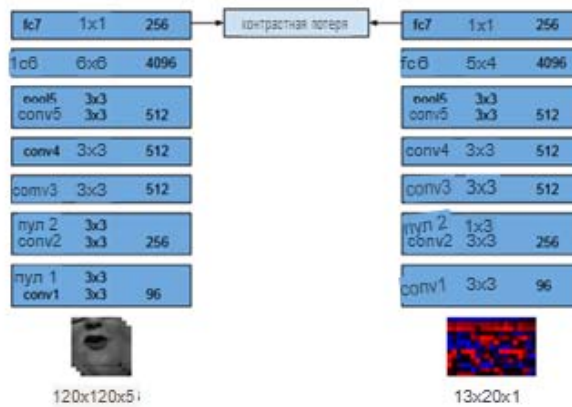


Рис. 4. Двухпоточная модель аудиовизуальной синхронизации: сопоставление эмбеддингов аудио и области рта/лица

В качестве базовой меры различия используется евклидово расстояние между эмбеддингами:

$$d_{\mathbb{R}} = \|v_{\mathbb{R}} - a_{\mathbb{R}}\|_2$$

а обучение может задаваться контрастной функцией потерь вида:
$$E = \left(\frac{1}{2N}\right) E_{(u=1,2)} (y_{\mathbb{R}} d_{\mathbb{R}}^2 + (1 - y_{\mathbb{R}}) \max(\text{margin} - d_{\mathbb{R}}, 0)^2)$$
, где $u \in \{0, 1\}$ задаёт синхронность пары, margin определяет разделяющий зазор [4]. Методически важно, что такая постановка позволяет получать устойчивую оценку степени синхронности и временного смещения без явной ручной разметки каждого кадра.

Для более общего случая, включающего разнообразные сюжеты и источники звука, актуальны подходы

аудиовизуальной синхронизации, где модель обучается выявлять согласованные по времени закономерности на уровне последовательностей признаков без жёсткой привязки к артикуляции [5]. В этих условиях синхронизация опирается не только на речевые признаки, но и на более общие аудиовизуальные зависимости (динамика сцен, характер событий, согласование статистики модальностей во времени), что повышает применимость к архивным материалам, содержащим смешанные сцены. Совокупно работы по аудиовизуальной синхронизации демонстрируют, что признаки аудио и видео могут служить основой критерия, чувствительного к временным нарушениям, включая рассинхронизацию и локальные разрывы временной шкалы [4, 5].

Дополнительное подтверждение актуальности мультимодальной постановки дают работы, где рассматривается совместная реставрация видео и аудио в рамках единой системы. В частности, предложен dual-stream подход для исторических новостных материалов, в котором обработка изображения и звука выполняется согласованно (через отдельные ветви модели), что подчёркивает практическую потребность в совместном улучшении модальностей, а не только в визуальном восстановлении [6].

Хотя задачи реставрации аудио и видео могут решаться разными методами, их совместное рассмотрение принципиально важно для архивных данных, где временная корректность является общим ограничением: улучшение изображения без выравнивания по времени может сохранять рассогласование с аудиодорожкой, а обработка аудио без учёта видеоряда не устраняет дефекты видео времени.

В качестве смежного, но методически полезного направления следует отметить задачи аудиовизуального улучшения речи, в которых видео (обычно область рта/лица) используется как дополнительная модальность для повышения качества аудиосигнала. Наличие бенчмарков и соревновательных постановок, включая AVSE Challenge, указывает на зрелость инфраструктуры мультимодальных методов: определены сценарии данных, метрики оценки и сравнительные протоколы [7]. Современные решения для AVSE, в том числе подходы, использующие предварительно обученные визуальные представления, демонстрируют устойчивость к шумовым условиям и вариативности сцен при корректной организации мультимодального согласования [8].

Для рассматриваемой задачи это важно не тем, что требуется улучшать речь как таковую, а тем, что данное направление предлагает проверяемые инструменты оценки качества мультимодальных признаков и стратегии переключения режимов в зависимости от условий наблюдения, что непосредственно соответствует требованию универсальности алгоритма для смешанных архивных сцен [7, 8].

С учётом рассмотренных классов методов постановку восстановления временной структуры архивного видео целесообразно формализовать как задачу оценки временного отображения, согласующего видеоряд и аудиодорожку. Пусть t – время на шкале видеоряда, тогда вводится функция временного смещения $\tau(t)$ и отображение времени: $\varphi(t) = \tau(t)$.

В отличие от константного смещения, функция $\tau(t)$ позволяет описывать как плавные искажения (дрейф временной базы), так и локальные нарушения временной шкалы. Для оценки $\tau(t)$ вводится критерий согласования аудио- и видео признаков, построенный по аналогии с эмбединг-подходом синхронизации [4] и моделями совместной обработки последовательностей признаков [5]. В простейшей форме ошибка согласования на окне времени для заданного сдвига τ может быть записана как:

$$D(t, \tau) = \|f_v(t) - f_a(t+\tau)\|_2$$

где $f_v(t)$ – признак видео, $f_a(t)$ – признак аудио. Тогда локальная оценка сдвига определяется как:

$$\tau^*(t) = \arg \min_{\tau \in [-\tau_{\max}, \tau_{\max}]} D(t, \tau)$$

для архивных данных локальная оценка $\tau^*(t)$ может быть неустойчивой в участках низкой информативности (например, при паузах в аудио или статичных сценах), поэтому используется регуляризация по времени, задающая компромисс между согласованностью и гладкостью:

$$\arg \min_{\tau(t)} \int D(t, \tau(t)) + \lambda \int (\tau(t) - \tau(t-1))^2,$$

где λ определяет степень сглаживания. Такая формализация позволяет интерпретировать результат: плавное изменение $\tau(t)$ соответствует дрейфу временной базы, тогда как локальные разрывы в $\varphi(t)$ указывают на вероятные выпадения/дублирование кадров либо монтажные разрывы. На практике анализ приращений $\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi(t-\Delta T)$ позволяет выделять аномальные участки: резкие скачки $\Delta\varphi(t)$ соответствуют разрывам временной шкалы, а аномально малые значения $\Delta\varphi(t)$ – участкам с возможным повторением кадров (дублирование). С учётом того, что архивный материал неоднороден по содержанию, универсальная офлайн-

методика должна учитывать различные типы сцен. В речевых фрагментах информативны признаки, связанные с артикуляцией и аудио признаками речи, что соответствует постановке [4], тогда как в общих сценах предпочтительны признаки, отражающие событийную динамику и совместную структуру последовательностей признаков, как в [5]. Для обеспечения универсальности вводится смешивание критериев согласования с коэффициентом доверия $g(t) \in [0,1]$, зависящим от условий наблюдения (наличие лица, голосовая активность, качество аудио, динамика изображения), что концептуально согласуется с практикой мультимодальных систем, ориентированных на разные режимы данных [7, 8]. В результате критерий согласования может быть записан как комбинация двух режимов (speech/event):

$$D(t, \tau) = g(t)D_s(t, \tau) + (1 - g(t))D_e(t, \tau),$$

где $D_s(t, \tau)$ и $D_e(t, \tau)$ – ошибки согласования для речевого и событийного режимов соответственно. Такая схема позволяет адаптировать оценку $\tau(t)$ к неоднородным архивным данным и повысить устойчивость восстановления временной структуры на протяжённых фрагментах.

Анализ результатов исследования

Таким образом, анализ работ по визуальной реставрации и ремастерингу [2, 3, 9], по аудиовизуальной синхронизации [4, 5], а также по совместной обработке модальностей и мультимодальным бенчмаркам [6-8] показывает, что достижение устойчивого качества реставрации требует совместного учёта пространственных, временных и межмодальных факторов. Визуальные модели обеспечивают подавление деградаций изображения и повышение межкадровой согласованности, тогда как аудиовизуальные модели предоставляют инструменты для оценки и коррекции временного соответствия модальностей. Формализация через $\tau(t)$ и $\varphi(t)$ задаёт основу для офлайн-алгоритма, ориентированного на устранение рассинхронизации, дрейфа временной базы и локальных нарушений временной структуры, и тем самым определяет направление дальнейшей разработки метода реставрационной обработки архивных видеоматериалов с использованием аудиовизуальной корреляции.

Дальнейшая задача – на основе обзора существующих методов восстановительной обработки и аудиовизуальной синхронизации сформулировать и в перспективе реализовать алгоритм реставрации архивных видеоматериалов, который прямо использует корреляцию между аудио- и видеоданными.

Литература

- ГОСТ 7.69–95. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Аудиовизуальные документы. Основные термины и определения. Введ. 01.07.1997. М.: Госстандарт России, 1997.
- Wang X., Mirmehdi M. Archive Film Defect Detection and Removal: An Automatic Restoration Framework // IEEE Transactions on Image Processing. 2012. Vol. 21, No. 8, pp. 3757-3769. doi:10.1109/TIP.2012.2194505.
- Iizuka S., Simo-Serra E. DeepRemaster: Temporal Source-Reference Attention Networks for Comprehensive Video Enhancement // ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia). 2019. Vol. 38, No. 6. Article 176. 13 p. doi:10.1145/3355089.3356570.
- Chung J. S., Zisserman A. Out of Time: Automated Lip Sync in the Wild // Computer Vision – ACCV 2016 Workshops: Proc. 13th Asian Conf. on Computer Vision. Cham: Springer, 2017. (Lecture Notes in Computer Science; Vol. 10117), pp. 251-263. doi:10.1007/978-3-319-54427-4_19.
- Chen H., Xie W., Afouras T., Nagrani A., Vedaldi A., Zisserman A. Audio-Visual Synchronisation in the Wild // British Machine Vision Conference (BMVC). 2021. 1-13 p. arXiv:2112.04432.
- Jia X., Zhang H., Hu C., Jia G. Joint Enhancement of Historical News Video Quality Using Modified Conditional GANs: A Dual-Stream Approach for Video and Audio Restoration // International Journal of Computer and Information System (IJCIS). 2024. Vol. 5, No. 1, pp. 79-90. doi:10.29040/ijcis.v5i1.208.
- Ma T., Aleksandra, Yin S., Yang L.-C., Zhang S. Real-Time Audio-Visual Speech Enhancement Using Pre-trained Visual Representations // arXiv. 2025. arXiv:2507.21448. doi:10.48550/arXiv.2507.21448.
- COG-MHEAR Audio-Visual Speech Enhancement Challenge (AVSE). Репозиторий GitHub: cogmhear/avse_challenge. Электронный ресурс.
- Rota C., Buzzelli M., Bianco S., et al. Video restoration based on deep learning: a comprehensive survey // Artificial Intelligence Review. 2023. Vol. 56, pp. 5317-5364. doi:10.1007/s10462-022-10302-5.
- Potashnikov A. M., Stroganova E. P., Vlasuyk I. V. Color contrast method based on subjective warmth and coldness // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Vol. 19, No. 3, pp. 69-76. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-3-69-76. – EDN BMCPUW.
- Носенко Ф. А., Ким Е. Д., Еремин И. А., Власюк И. В. Исследование методов выбора параметров видеокон-

трольных устройств для потребления медиаконтента стриминговых сервисов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2025. Т. 16, № 1. С. 4-13. EDN OCBUYD.

12. *Вотяков С. Ю., Комина А. О., Власюк И. В.* Анализ способов применения моделей глубокого обучения в видеокомпрессии // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2025. Т. 15, № 1. С. 43-48. EDN TUIAAD.

13. *Власюк И. В., Жабичуккая А. П., Пантелеева Ю. В.* Исследование методов контроля выполнения упражнений восстановительной глазной гимнастики // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2025. Т. 15, № 1. С. 21-31. EDN EDPLLY.

14. *Ivanchev V. V., Vlasuyk I. V., Stroganova E. P.* Objective assessment of colours' warmth // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Vol. 18, No. 1, pp. 44-50. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-1-44-50. EDN EKABXU.

15. *Степанов Н. С., Матуа Д. Д., Мазин В. А.* и др. Анализ текущих алгоритмов вычисления области регионов интереса пользователей при потоковой передаче видеоконтента // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 2. С. 27-32. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-2-27-32. EDN EDUWQJ.

16. *Романов С. Г., Власюк И. В.* Методика расчета параметров анти-алайсинговых фильтров для коррекции спектральных характеристик в зависимости от используемых структур дискретизации массивов светофильтров // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 5. С. 4-13. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-5-4-13. EDN AKGLYF.

17. *Safonov I., Vyatkin M., Hizhenkova O.* et al. Threat analysis and security of personal data using user devices with eye-trackers // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Vol. 17, No. 8, pp. 56-62. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-8-56-62. EDN PMVBFC.

18. *Власюк И. В., Узеев А. А., Пахомова Е. А.* Исследование методов коррекции изображений с расширенным динамическим диапазоном для воспроизведения на устройствах с ограниченными параметрами отображения // Телекоммуникации и информационные технологии. 2023. Т. 10, № 1. С. 135-144. EDN LSZPTU.

19. *Иванчев В. В., Власюк И. В.* Метод распределения выборки цветовых оттенков в цветовом пространстве Cielch // Телекоммуникации и информационные технологии. 2022. Т. 9, № 2. С. 108-119. EDN NQMPTR.

20. *Mozhaeva A., Vashenko E., Selivanov V.* et al. Analysis of current video databases for quality assessment // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Vol. 16, No. 2, pp. 48-56. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-2-48-56. EDN KRCZDN.

21. *Vyatkin M., Potashnikov A., Selivanov V.* et al. Method of preventing leakage of personal data through eyetracking modules of user devices // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Vol. 16, No. 7, pp. 44-51. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-7-44-51. EDN KVXNIL.

22. *Ревина Д. С., Левченко Р. Р., Маликов А. Ю.* и др. Анализ эффективности безреференсных метрик оценки качества видео последовательности // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. Т. 13, № 2. С. 41-53. EDN JOBPVB.

23. *Власюк И. В., Киселева А. С.* Анализ эффективности безреференсных метрик применительно к оценке качества видео при потоковой передаче // Телекоммуникации и информационные технологии. 2022. Т. 9, № 2. С. 65-74. EDN QHZONM.

24. *Егоров Д. А., Федоров В. Д., Лейман В. В., Власюк И. В.* Методика оценки пространственно-частотной характеристики камер на основе генеративных случайных последовательностей // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11, № 1. С. 47-53. EDN UKBGVI.

25. *Можяева А. И., Власюк И. В., Поташиников А. М., Стример Л.* Эталонная объективная метрика оценки качества видео совместимая с PSNR учитывающая частотные и периферическую характеристики зрения человека // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11, № 2. С. 44-54. EDN TQJSHP.

МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАДЕРЖЕК ПАКЕТОВ СООБЩЕНИЙ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ УЗЛАХ ДОСТУПА

Короткова Виктория Игоревна

МТУСИ, ассистент, Москва, Россия,
v.i.korotkova@yandex.ru

Пшеничников Анатолий Павлович

МТУСИ, профессор, к.т.н., Москва, Россия,
psheni4nikov@yandex.ru

Ярыгин Михаил Александрович

МТУСИ, техник, Москва, Россия,
m.a.yarygin@mtuci.ru

Аннотация

Проанализированы ключевые функции сети доступа: формирование пакетов голосовых сигналов, передачи данных, видеоконференцсвязи; методы реализации виртуальных локальных сетей VLAN; принципы построения очередей; распределение пакетов по очередям, исходя из уровня приоритета обслуживания; циклическое обслуживание очередей по строгому приоритету. Приведены результаты расчёта ключевых характеристик функционирования сети доступа.

Ключевые слова:

Сеть доступа, качество обслуживания, пакетизация сообщений, интенсивности пакетов и нагрузки, классы приоритетов, система поллинга.

Введение

Стремительное развитие мобильных телекоммуникационных технологий (4G, 5G и перспективные разработки 6G) предъявляет повышенные требования к фиксированным сетям связи, которые обеспечивают обмен огромными массивами цифровой информации, включая трафик, генерируемый мобильными устройствами. К таким требованиям относятся:

- минимизация временных задержек при передаче данных вплоть до микросекунд;
- достижение сверхвысоких требований по надёжности;
- поддержка больших объёмов трафика и высоких скоростей передачи данных.

В современных реалиях Международный союз электросвязи (МСЭ-Т) инициировал создание специальной целевой группы FG NET–2030 в 2018 году, чтобы изучить потенциал развития будущих фиксированных коммуникационных сетей [1]. Завершив свою деятельность в 2020 году, группа представила детальное видение функционала и характеристик фиксированных сетей связи, необходимых к 2030 году и последующему периоду. Полностью ознакомиться с результатами исследований FG NET–2030 можно в публикациях, указанных в источниках [2, 3].

Перспективная концепция Сети 2030 (NET–2030), разработанная целевой группой FG, включает ключевые элементы архитектуры пограничных сетей и сетей доступа, среди которых выделены следующие составляющие (Рис. 1):

- обеспечение взаимодействия с разнообразными периферийными аппаратами, включая пользовательские гаджеты, автоматические управляющие комплексы оборудования, сенсорные модули и измерительные приборы;
- организация инфраструктуры проводного подключения, беспроводного покрытия сети, осуществление администрирования базовых станций и поддержание их стабильную работу;
- сегменты граничной сети: передний сегмент FH (Fronthaul), обеспечивающий связь между радио блоком сети 5G и распределённым блоком вычислительной обработки DU (Distributed Unit); задний сегмент ВН (Backhaul), соединяющий граничную сеть и транспортную сеть (ядро магистральной сети). Кроме того, между FH и ВН возможно размещение среднего сегмента граничной сети МН (Midhaul).



Рис. 1. Основные компоненты сети доступа/граничной сети

Максимальная суммарная задержка в трёх сегментах граничной сети не должна превышать 10 мс. Если речь идёт о сервисах, особо чувствительных к задержкам, этот показатель не должен превышать 5 мс [4]:

- *граничные вычисления* ЕС (Edge Computing) необходимы для обеспечения функционирования множества сетевых приложений, управления передачей данных и хранения промежуточных результатов обработки информации;

- *граничное взаимодействие* подразумевает учёт аспектов, касающихся информационной составляющей, объединения компонентов системы, защиты данных и условий согласованного взаимодействия элементов инфраструктуры;

- *уровень контроллеров* включает, например, SDN (Software-Defined Networking)-контроллер, RAN (Radio Access Network)-контроллер, контроллер сетевого среза (Slice Controller), контроллер качества услуг.

Система сотовой связи пятого поколения 5G имеет следующие основные показатели [5]:

- *пиковая скорость передачи данных* в радиоканале от сети к пользователю (Downlink) – до 20 Гбит/с;
- *пиковая скорость передачи данных* обратного радиоканала от пользователя к сети (Uplink) – до 10 Гбит/с;
- *минимальная задержка* в подсистеме радиодоступа для услуг URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications – сверхнадёжная межмашинная связь с низкими задержками) составляет всего лишь 0,5 мс, тогда как для технологий eMBB (enhanced Mobile Broadband – сверхширокополосная мобильная связь) этот показатель достигает отметки в 4 мс.

Одним из ключевых показателей сетевого качества обслуживания QoS в пакетных IP-сетях является величина задержки доставки IP-пакетов IPTD (IP Packet Transfer Delay). Согласно рекомендации МСЭ-Т Y.1541, ключевым показателем служит среднее значение величины [6].

Время задержки IP-пакетов нормированы для различных классов сетевого качества обслуживания QoS. Например, для самого высшего класса QoS максимальная допустимая задержка не должна превышать 100 мс, а колебания времени доставки (джиттер) ограничены значением 50 мс.

Согласно данным исследований проекта FG NET-2030, прогнозируется увеличение пропускной способности каналов передачи данных в сетях доступа/граничных сетях со 100 Мбит/с до 10 Гбит/с к 2030 году. Одновременно с этим, задержки передачи пакетов сократятся с исходных 100 мс до 1 мс (рис. 2). В связи с такими изменениями, разработка метода оценки задержек пакетов сообщений в мультисервисных узлах доступа приобретает особую значимость.

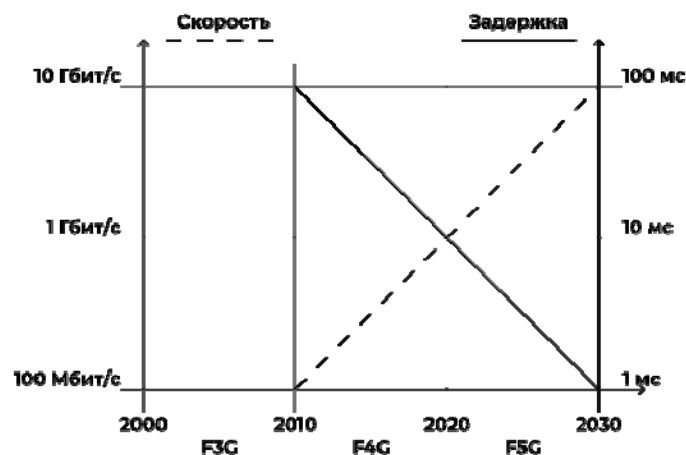


Рис. 2. Эволюция основных параметров сетей доступа/граничных сетей (F3G, F4G, F5G – поколения сетей фиксированной связи)

1. Процедуры обработки пакетов сообщений в мультисервисных узлах доступа

Коммутаторы узлов доступа получают пакеты с различными приоритетами обслуживания, которые обязаны передаваться параллельно по единой физической сети. Чтобы решить данную проблему, была внедрена технология виртуальных локальных сетей – VLAN (Virtual Local Area Network), реализованная с помощью открытого стандарта IEEE 802.1Q, интегрированного в технологию IEEE 802.3 Ethernet. Стандарт IEEE 802.1Q предусматривает включение специальной метки размером 4 байта в кадр Ethernet непосредственно после адреса отправителя и перед указанием типа/длины пакета. Вследствие добавления этой метки минимальный размер поля данных сокращается с первоначальных 46 байт до 42 байт. Структура самой метки представлена в таблице 1.

Таблица 1

Формат метки по IEEE 802.1Q

Идентификатор меток 0x8100, бит	Управляющая информация метки		
	Приоритет, бит	Допустимость удаления, бит	Идентификатор VLAN, бит
16	3	1	12

Управляющая информация метки включает три компонента:

- код приоритета 3 бита, определяющий $2^3=8$ возможных уровней приоритета трафика (таблица 2);
- однобитовый индикатор допустимости отбрасывания кадров при возникновении перегрузок в сети;
- идентификаторы VLAN в 12 бит, которые показывают принадлежность конкретного кадра определённой виртуальной сети. Идентификатор VLAN может принимать $2^{12}=4096$ значений. Однако значения 0 и 4096 зарезервированы, следовательно, реально допустимыми остаются номера для маркировки 4094 виртуальных сетей.

Таблица 2

Классы приоритетов по обслуживанию QoS

Класс QoS	Код	Тип	Назначение
0	000	Routine	Самый низкий приоритет (рутина)
1	001	Best Effort Service	Негарантированная доставка
2	010	Immediate	Данные с высоким приоритетом
3	011	Flash	Важные приложения
4	100	Flash Override	Передача видео
5	101	Enterprise Cache Protocol	Передача голоса
6	110	Routing	Межсетевая маршрутизация
7	111	Network Management Traffic	Трафик управления сетью. Самый высокий приоритет.

Указанного количества меток вполне достаточно для корпоративных сетей, однако оно оказывается недостаточным для сетей общего пользования. Именно поэтому в 2005 году к существующему стандарту IEEE 802.1Q ввели дополнительное расширение – спецификацию 802.1ad (технология *Q-in-Q*). Новая версия предполагает использование двух типов меток: сервисную и клиентскую, каждая из которых позволяет определить идентификационный номер VLAN. Благодаря этому нововведению максимальное количество поддерживаемых VLAN возрастает до величины $4094 \times 4094 = 16760836$.

Технология *Q-in-Q* даёт возможность организовать отдельные изолированные сегменты внутри единого пространства VLAN путём наложения ещё одного дополнительного тега поверх стандартного заголовка Ethernet-кадра. Эта технология известна также как *Q-туннелирование*, детально изложена в стандарте IEEE 802.1ad. Она подразумевает применение двух типов специальных тегов: **S-Tag** (Service Tag – служебный тег) и **C-Tag** (Customer Tag – клиентский тег), используемых для идентификации конкретных сегментов виртуальной сети в рамках реализации указанного протокола.

На втором (канальном) уровне модели OSI в среде технологий Ethernet качество сервиса определяется параметром CoS (Class of Service – класс услуг). Этот показатель представлен 3-битным полем, предназначенным для классификации и маркировки кадров согласно международному стандарту IEEE 802.1p. Данное поле размещается в составе 4-байтового заголовка, соответствующего протоколу IEEE802.1Q.

При функционировании на сетевом (третьем) уровне используется метод пометки сетевых пакетов, именуемый DSCP (код различимых сервисов). Этот способ служит для распределения поступающего трафика в IP-сетях путём разделения потока данных на категории согласно уровням приоритета обслуживания.

Значения CoS на интерфейсах L_2 и L_3 должны быть доверенными.

Клиентская (внутренняя) метка CE-VLAN (Customer Edge), устанавливаемая на границе оборудования клиента, поддерживает значение идентификатора формата меток 0x8100. Интерфейс **UNI (User-to-Network Interface)** в сетях Ethernet служит местом сопряжения аппаратуры конечного пользователя с ресурсами оператора сети. Фактически этот интерфейс представляет собой точку подключения пользовательского устройства к магистральной части сети провайдера.

Стандарт IEEE 802.1ad определяет сервисную (внешнюю) метку с маркировочным идентификатором протокола 0x88a8, известным как metro tag. **SP-VLAN (Service Provider VLAN)** представляет собой специальный уникальный идентификатор виртуальной сети, применяемый операторами связи для предоставления услуг пользователям, чьи сети включают несколько отдельных виртуальных сетей VLAN.

Подключение каналов Ethernet к выходам пакетных коммутаторов осуществляется с помощью интерфейса **NNI (Network-to-Network Interface)**, обеспечивающего физический либо виртуальный стык между сетевыми сегментами.

2. Структура и компоненты системы стохастического поллинга

Системы циклического опроса, (*системы поллинга* – polling system) представляют собой разновидность систем массового обслуживания с несколькими очередями. При конечном или счётном числе очередей система поллинга называется *дискретной*. Каждый отдельный канал образует собственную очередь поступающих пакетов. Сервер последовательно перемещается между этими очередями согласно заданному алгоритму и обрабатывает накопленные запросы.

На (Рис. 3) приведены основные параметры дискретных систем поллинга. Параметры, выделенные жирным шрифтом, приняты в качестве базовых условий для последующей задачи.

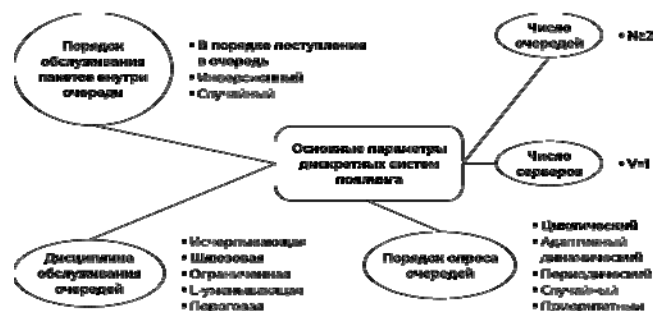


Рис. 3. Основные параметры дискретных систем поллинга

Процесс работы системы поллинга. Подключение сервера к каждой отдельной очереди выполняется согласно определённому алгоритму, известному как *порядок опроса*. Одним из наиболее часто применяемых вариантов является *циклический опрос*, при котором сервер последовательно обращается ко всем существующим очередям, начиная с первой и заканчивая последней, затем вновь возвращаясь к исходной позиции. Если очередь пуста, обработка прерывается, и сервер переходит к последующей очереди. В противном случае осуществляется обслуживание поступающих запросов в рамках *дисциплины обслуживания*, определяющей число обслуживаемых пакетов за одну итерацию обращения к конкретной очереди.

Маркированные кадры и пакеты на втором и третьем уровнях распределяются по соответствующим очередям, располагаясь в порядке убывания значимости: сначала размещаются элементы с наивысшим уровнем приоритета, далее следуют менее важные.

Цикл – это последовательность опроса сервером всех очередей от Q_1 до Q_N , $N \geq 2$.

Циклический опрос называется *статическим*, если последовательность переключения между очередями остаётся постоянной на всём этапе функционирования системы.

Допустим, что ёмкость каждой очереди теоретически бесконечна. Дисциплина обслуживания устанавливает, какое именно число заявок сервер успеет обработать за одно своё посещение очереди. Рассматриваемая нами модель базируется на *шлюзовой дисциплине обслуживания*: всякий раз, обращаясь к очереди, сервер исполняет все запросы, накопившиеся к началу очередного цикла обработки. Заявки, прибывшие в очередь непосредственно в ходе её активной обработки, переносятся на следующий этап обслуживания. Такой подход помогает избежать ситуации, когда одна очередь целиком поглощает ресурсы сервера.

Началом опроса очереди – начало процедуры опроса очереди совпадает с моментом завершения сервером операции перехода и готовности начать обработку выбранных заданий. Посещение сервером очереди охватывает временной промежуток, включающий стадию оценки статуса очереди и последующие этапы её обслуживания, если в очереди присутствуют ожидающие обработки запросы.

Интервал времени, затрачиваемый сервером на подготовку и смену очереди перед началом её обслуживания, обозначают *временем переключения*.

Ещё одним важным параметром системы является *дисциплина обслуживания заявок в очереди* – определяет последовательность обработки заявок, попадающих под текущее посещение сервером. В дальнейшем предположим, что обработка пакетов выполняется в той же последовательности, в которой поступили в очередь. Алгоритм циклического опроса очередей вызывает появление временных задержек при транспортировке трафика. Чтобы оценить величину задержки трафика в очередях используются методы производящих функций, анализа средних длин очередей, машинного обучения [7].

Модель системы стохастического поллинга. На (Рис. 4) представлена упрощённая модель системы стохастического поллинга.

Основные обозначения элементов этой модели:

Q_i – представляет собой i -ую очередь, где $i = \overline{1, N}$. Параметры каждой очереди включают:

λ_i – интенсивность поступления заявок в очередь;

t_i – среднее время, необходимое для обслуживания одной заявки;

s_i – среднее время установления соединения сервера с i -ой очередью;

ρ_i – коэффициент загрузки очереди, характеризующий среднюю продолжительность обслуживания заявок.

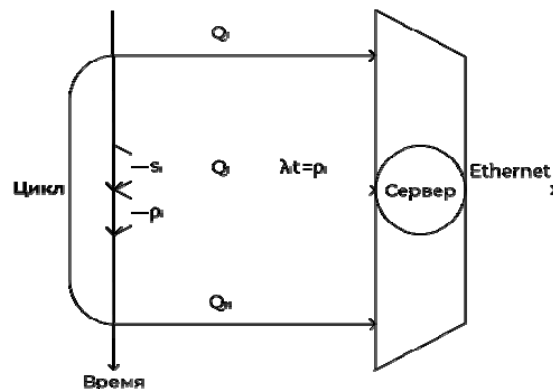


Рис. 4. Простейшая модель системы стохастического поллинга

Продолжительность обслуживания заявок внутри очереди характеризуется независимым и однородным распределением с марковским законом распределения вероятностей, при этом среднее значение продолжительности обслуживания одной заявки в i -ой очереди составляет t_i . Среднее время обслуживания заявок в i -ой очереди (интенсивность поступающей нагрузки i -ой очереди) $\rho_i = \lambda_i t_i$.

Суммарное время обслуживания заявок во всех N очередях за один цикл (суммарная интенсивность поступающей нагрузки системы поллинга за один цикл):

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i.$$

Суммарное время переключения сервера за один цикл:

$$S = \sum_{i=1}^N s_i.$$

Среднее время цикла C формируется из суммы промежутков времени, затраченных на обслуживание всех очередей ρC и интервал переключения между ними S , следовательно:

$$C = \rho C + S,$$

откуда среднее время цикла:

$$C = S / (1 - \rho).$$

3. Метод расчёта среднего числа заявок L_i в очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$

Исследование в области анализа систем стохастического поллинга изложено в источнике [9]. Основные подходы к изучению таких систем включают использование *метода производящих функций*, дающих точные решения в ряде случаев, и *метода приближенных вычислений средних длин очередей (метода средних)* [7, 8], отличающегося простотой реализации в алгоритмах и возможностью получать численные оценки показателей системы. Погрешность приближенного метода средних относительно метода производящих функций составляет 3-5% [7].

Критерии устойчивого функционирования стационарного состояния в системах поллинга были детально изучены и систематизированы в [10]. Для гарантированного наличия стационарного режима в системах стохастического поллинга необходимым условием служит выполнение неравенства, сформулированного в уравнении (1).

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i < 1. \tag{1}$$

Метод приближенных вычислений средних длин очередей использует итерационную схему расчёта стационарных вероятностей опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$, и среднего времени цикла C .

$$u_i^{n+1} = 1 / (1 + e^{-\lambda_i C^n}), \quad i = \overline{1, N}, \tag{2}$$

$$C^{n+1} = \frac{1}{1 - \rho} \left[\sum_{i=1}^N s_i u_i^{n+1} + \beta \prod_{i=1}^N (1 - u_i^{n+1}) \right], \tag{3}$$

где β – параметр прогулки сервера. Система уравнений (2–3) решается с применением итерационного метода простых итераций.

Время пребывания сервера у очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$, определяется по выражению (4):

$$v_i = \rho_i C + s_i (u_i + u) + \frac{u}{\beta N}, \tag{4}$$

где u – вероятность пропуска всех очередей в процессе обслуживания, рассчитываемая следующим образом:

$$u = \prod_{i=1}^N (1 - u_i^{n+1}).$$

При существенном увеличении частоты поступления заявок хотя бы в одну из очередей, указанное значение приближается к нулевому, вследствие чего формула (4) принимает вид:

$$v_i = \rho_i C + s_i u_i.$$

Средняя продолжительность (i, j) -го периода определяется по выражению (5):

$$v_{i,j} = \sum_{n=i}^{i+j-1} v_n. \quad (5)$$

Доля времени, занимаемое сервером в периоде (i, j) , рассчитывается отношением среднего значения длительности периода (i, j) в течение цикла к средней продолжительности цикла, что определяется по формуле (6):

$$q_{i,j} = v_{i,j} / C. \quad (6)$$

Пусть L_i есть среднее число заявок в очереди Q_i , когда сервер занят обслуживанием очереди Q_i , $i, j = \overline{1, N}$.

При *шлюзовой* дисциплине обслуживания очереди Q_i , условное среднее L_i определяется суммой двух слагаемых:

- среднее число заявок, обслуживаемых сервером за время посещения очереди $Q_i - \bar{L}_i$;
- среднее число заявок, поступивших в очередь при опросе и после опроса i -ой очереди – $\tilde{L}_{i,j}$.

Значения числа заявок $\tilde{L}_{i,n}$ определяются по формуле (7):

$$\sum_{n=i}^{i+j-1} \frac{q_{n,1}}{q_{i,j}} \tilde{L}_{i,n} = \lambda_i \left(v_{i,j} + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N u_m s_m \right). \quad (7)$$

Расчёт длины очереди $\tilde{L}_{i,j}$ в период (i, j) выполняется с помощью двух циклов: цикл по $i = \overline{1, N}$ (здесь i – номер очереди) и вложенный цикл по $j = \overline{i, N}$.

Блок–схема алгоритма вычисления стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$ и значения среднего времени цикла C приведена на (Рис. 5).

Длина очереди $\tilde{L}_{i,j}$ в период (i, j) соответствует количеству заявок, поступивших в очередь в течение рассматриваемого периода.

В системе уравнений (7) значения параметров v_i , $v_{i,j}$ и $q_{i,j}$ рассчитываются по выражениям (4), (5) и (6) соответственно.

Среднее число заявок \bar{L}_i , обрабатываемых сервером в течение периода пребывания в очереди Q_i , осуществляется согласно формуле (8):

$$\bar{L}_i = \lambda_i \frac{u_i}{\rho_i} \left(v_i + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N u_m s_m \right) - (1-\rho_i) \frac{u_i}{\rho_i} \sum_{n=1}^N q_{n,1} \tilde{L}_{i,n}. \quad (8)$$

После вычисления значений $\tilde{L}_{i,j}$ и \bar{L}_i по выражениям (7) и (8) соответственно, среднее число заявок L_i в очереди вычисляется по выражению (9):

$$L_i = \sum_{n=1}^N q_{n,1} \tilde{L}_{i,n} + q_{i,1} \frac{\rho_i}{u_i} \bar{L}_i. \quad (9)$$

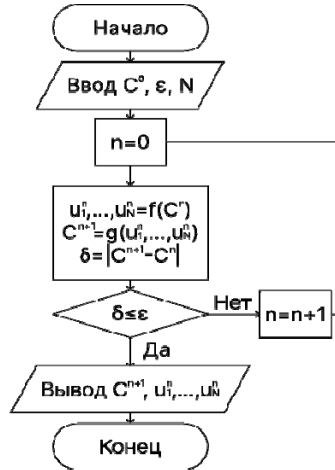


Рис. 5. Блок-схема алгоритма вычислений стационарных вероятностей u_i опроса очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$ и значения среднего времени цикла C

Среднее время пребывания заявки в очереди определяется по теореме Дж. Литтла (10):

$$W_i = L_i / \lambda_i. \tag{10}$$

Численное решение задачи оценки задержек в трёх очередях, обрабатывающих голосовые сообщения, видеоконференцсвязь и передачу данных, продемонстрировало следующее [11]: средняя величина задержки обработки пакетов в узле доступа для голосового трафика составила порядка 16 мс.

Согласно рекомендациям МСЭ–Т Y.1541 (12/2011) [6], среднее значение нормированной сетевой задержки доставки IP-пакетов при передаче голоса при высшем классе качества обслуживания составляет 100 мс. Общая сетевая задержка складывается из четырёх компонентов: временной интервал обработки сигнала, ожидания в буфере, передача сигнала по каналу связи и распространение волны.

Сравнение полученных расчётных величин задержек для голосовых IP-пакетов в очередях с рекомендуемыми нормами МСЭ–Т демонстрирует значимость и своевременность поставленных целей исследования, проводимого в рамках данной задачи.

4. Анализ характеристик системы поллинга с тремя типами трафика

Рассмотрим систему поллинга для $N = 3$. Будем считать, что сервер обладает следующими характеристиками:

Производительность сервера – $V_{сервер} = 30$ Гбит/с;

Время переключения между очередями – $s_i = 3$ мкс;

Будем считать, что сервер обслуживает $N = 3$ типов трафика – голосовой трафик, видеоконференцсвязь (ВКС) и передача данных (ПД). Входные параметры данных трафиков приведены в таблице 3.

Таблица 3

Входные параметры трафиков

Трафик	Параметры
Голосовой трафик	Число пользователей в ЧНН: 10 000. Число вызовов одного пользователя в ЧНН: 4. Кодек: G.711.
ВКС	Кодек: H.264. Число пользователей в ЧНН: 2. Длительность сеанса: 20 мин.
ПД	Число пользователей в ЧНН: 30. Скорость скачивания: 10 Мбит/с. Время скачивания: 10 мин.

Очередь Q_1 занимается обработкой пакетов голосовых данных, поступающих от $n_{\text{гол}}$ абонентов в час наибольшей нагрузки (ЧНН). Каждый абонент формирует в ЧНН среднее количество пакетов равное $c_{\text{чнн}}$, причём средняя длительность одного вызова $t_{\text{выз}} = 72$ с [12]. Если применяется кодек стандарта G.711, объём каждого голосового пакета равен 160 байт, интервал формирования пакета $t_{\text{пак}} = 20$ мс. С учётом адресной информации общий размер голосового кадра Ethernet составляет $d_{\text{кадр}} = 218$ байт.

Очередь Q_2 обслуживает данные ВКС длительностью $t_{\text{вкс}}$ с. Кодек H.264 обладает характеристиками, указанными в таблице 4 [13].

Расчёт интенсивностей ВКС проводится по (11-15):

Объём информации ВКС от 1 пользователя

$$d_{\text{вкс}}^1 = V_{\text{вкс}} t_{\text{вкс}} \quad (11)$$

Объём информации ВКС от $n_{\text{вкс}}$ пользователей:

$$d_{\text{вкс}}^2 = n_{\text{вкс}} d_{\text{вкс}}^1 \quad (12)$$

Интенсивность заявок ВКС:

$$\lambda_{\text{вкс}} = n_{\text{вкс}} n_{\text{кадр}} t_{\text{вкс}} \quad (13)$$

Время обслуживания заявки ВКС:

$$t_{\text{обсл}} = d_{\text{вкс}}^2 / V_{\text{сервер}} \quad (14)$$

Интенсивность нагрузки при обслуживании заявки ВКС:

$$\rho_{\text{вкс}} = t_{\text{обсл}} / 3600 \quad (15)$$

Таблица 4

Параметры видео-кодеков

Кодек	H.264	H.265
Битрейт, Мбит/с	5÷7	8÷10
Разрешение, пикс.	1280x720	1920x1080
Частота кадров, к/с	25	25
Глубина цвета, бит	8	8

Очередь Q_3 обеспечивает передачу данных для $n_{\text{пд}}$ пользователей в ЧНН со скоростью скачивания $V_{\text{пд}}$ бит/с и длительностью $t_{\text{пд}}$ с.

Определение значений интенсивности поступления пакетов и нагрузки системы опроса в рамках одного цикла для голосового потока и потока данных осуществлялось таким же образом, как предложено в источнике [11]. Результаты расчёта интенсивностей для всех очередей представлены в таблице 5.

Таблица 5

Интенсивности для очередей

i	λ_i , пакеты	ρ_i , Эрл
1	$144.0 \cdot 10^6$	0.002165635
2	$60.0 \cdot 10^3$	0.000108507
3	$18.0 \cdot 10^3$	0.001627604

Суммарная интенсивность поступающей нагрузки системы поллинга за один цикл: $\rho = 0.0039$ Эрл. Параметры из таблицы 5 являются входными данными для анализа сервера с точки зрения теории массового обслуживания.

Таблица 6 отображает результаты расчёта среднего времени цикла и стационарных вероятностей. Для начальной оценки среднего времени цикла принято значение $C^0 = S / (1 - \rho) = 9.035$ мкс. Алгоритм работы и величина $\delta^N = |C^N - C^{N-1}|$ описываются в соответствии блок-схемы (Рис. 5). На (Рис. 6) показана зависимость погрешности от числа итераций.

Наблюдается характер экспоненциального спада отклонения результатов. Применяя метод наименьших квадратов, выведена приближенная зависимость:

$$\delta^N \approx 2.359 \cdot 10^{-1.239(N-1)} \text{ мкс.}$$

Следовательно, каждая последующая итерация уменьшает ошибку более чем в 10 раз, что свидетельствует о высоком уровне скорости сходимости процесса.

Результаты расчёта числа заявок и задержек в очередях по формулам (4-10) представлены в таблице 7.

Таблица 6

Расчёт среднего времени цикла и стационарных вероятностей

N	C^N , мкс	δ^N , мкс	u_1^N	u_2^N	u_3^N
0	9.035	-	0.5	0.5	0.5
1	6.544	2.491	1.0	0.63230433	0.54056926
2	6.404	0.140	1.0	0.59692029	0.52941469
3	6.396	$8.0 \cdot 10^{-3}$	1.0	0.59489521	0.52878609
4	6.396	$4.6 \cdot 10^{-4}$	1.0	0.59477964	0.52875025
5	6.396	$2.6 \cdot 10^{-5}$	1.0	0.59477305	0.52874820
6	6.396	$1.5 \cdot 10^{-6}$	1.0	0.59477267	0.52874809
7	6.396	$8.5 \cdot 10^{-8}$	1.0	0.59477265	0.52874808
8	6.396	$4.8 \cdot 10^{-9}$	1.0	0.59477265	0.52874808
9	6.396	$2.8 \cdot 10^{-10}$	1.0	0.59477265	0.52874808
10	6.396	$1.6 \cdot 10^{-11}$	1.0	0.59477265	0.52874808
11	6.396	$9.0 \cdot 10^{-13}$	1.0	0.59477265	0.52874808

Таблица 7

Число заявок и задержки в очередях

i	L_i , заявок	W_i , мс
1	435.989	10.9
2	0.219	13.143
3	0.070	13.982

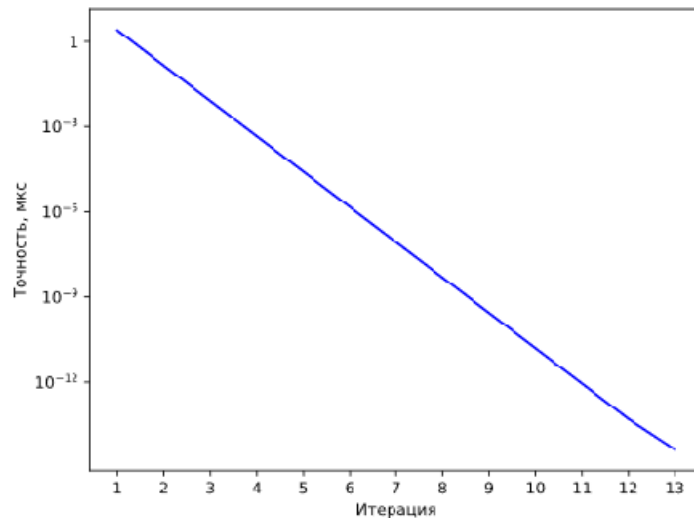


Рис. 6. Зависимость погрешности определения средней длительности цикла δ^N после N итераций

Заключение

Проанализированы ключевые элементы перспективной сети доступа/граничной сети, включая потенциальные участки мобильного радиодоступа пятого поколения (5G).

Соответственно результатам исследовательских проектов FG NET–2030 МСЭ-Т, представлены зависимости изменения пиковой скорости и значений задержек IP-пакетов при предоставлении услуг с использованием перспективных технологий.

Рассмотрена технология организации виртуальных локальных сетей – VLAN с помощью открытого стандарта IEEE 802.1Q в технологии IEEE 802.3 Ethernet. Представлена классификация деления потоков сообщений на классы приоритетов по обслуживанию.

Представлены структурная схема и главные элементы модели системы стохастического поллинга применительно к поставленной задаче. Для приближенных вычислений средних длин очередей предложена соответствующая система уравнений и блок–схема алгоритма вычислений стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$ и среднего времени цикла C методом простых итераций.

Средняя длительность пребывания заявки в очереди определена на основании известного принципа, сформулированного Джоном Литтлом.

Алгоритм расчёта значений задержек пакетов сообщений в мультисервисных узлах доступа разработан в форме программного продукта на платформе Python.

Разработанная модель системы поллинга доказала свою эффективность для оценки поведения сети доступа в условиях сложной многоуровневой нагрузки. Применение представленного подхода позволит операторам оптимизировать работу сетевых узлов, улучшая качество предоставляемых услуг и удовлетворённость клиентов.

Литература

1. Focus Group on Technologies for Network 2030 (FG NET-2030) [Электронный ресурс]: официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx> (Дата обращения: 20.11.2025).
2. Росляков А.В. СЕТЬ 2030: архитектура, технологии, услуги. – М.: ООО «ИКЦ «Колос–с», 2022. 278 с.
3. Росляков А.В. Сети фиксированной связи пятого поколения. Учебное пособие. М.: ООО «ИКЦ «Колос–с», 2024. 232 с.
4. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль А.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. М.: Издательский дом Медиа Паблишер, 2019. 376 с.
5. Захаркин С.В., Иванов В.А., Коньшев М.Ю. и др. Мобильные системы связи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком 2023. 408 с.
6. Рекомендация МСЭ-Т Y.1541 (11/2019). Сетевые характеристики качества обслуживания для сетей на базе IP / Международный союз электросвязи (МСЭ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541> (Дата обращения: 20.11.2025).
7. Вишневский В.М., Семенова О.В. Методы машинного обучения для исследования стохастических моделей циклического опроса в широкополосных беспроводных сетях. Научное электронное издание. М.: ИПУ РАН. 2023. 120 с.
8. Вишневский В.М., Семенова О.В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. М.: Техносфера, 2007. 312 с.
9. Вишневский В.М., Семенова О.В. Обзор моделей систем поллинга и их применение в телекоммуникационных сетях (часть 1) // Проблемы информатики. 2020. №3. С. 29-59. (часть 2) // Проблемы информатики. 2020. №4. С. 43-70.
10. Saffer Z., Telek M. Stability of periodic polling system with BMAP arrivals // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 197, No. 1, pp. 188-195.
11. Короткова В.И., Пшеничников А.П. Оценка задержек при циклическом опросе очередей в мультисервисных узлах доступа // Электросвязь, 2025. №1. С. 29-34.
12. Пшеничников А.П. Теория телетрафика: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 223 с.
13. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 июня 2025 г. N 984 «Об утверждении требований к техническим и программным средствам, используемым федеральными органами исполнительной власти и их должностными лицами при организации применения систем видео-конференц-связи и веб-конференции».

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРИБОВИДНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Кухаренко Александр Сергеевич

д.т.н., доцент Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова – Департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия

alexk.05@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4918-6024

Чуча Глеб Георгиевич

студент Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова – Департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия

gschucha@edu.hse.ru

Хади Хусейн

студент Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова – Департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия

kkhusein@edu.hse.ru

Аннотация

При разработке современных приборов и устройств СВЧ-диапазона важной частью конструкции становятся частотно-селективные поверхности, используемые в качестве специальных экранов, отражателей или же в качестве элементов фокусировки электромагнитного поля. Особое место среди частотно-селективных поверхностей занимают метаматериалы – структуры, обладающие отрицательными действующими значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Однако, на пути разработки структур на основе метаматериалов встает проблема их синтеза и расчета при помощи средств электродинамического моделирования, реализованных в современных системах автоматизированного проектирования. Размеры резонансных элементов этих конструкций много меньше рабочей длины волны. В то же время основные свойства структуры определяются характером взаимодействия структурных элементов между собой. По этой причине при моделировании необходимо проектировать структуру, состоящую из большого числа малых по размеру элементов, связанных между собой. Это приводит к тому, что при проведении компьютерного моделирования стандартными численными методами структура разбивается на большое количество элементов сетки, что приводит к необходимости использования значительных вычислительных ресурсов и существенным временным затратам на проведение расчета. В связи с этим возникает задача оптимизации процесса расчета параметров метаматериалов и устройств на их основе с использованием средств электродинамического моделирования. В работе показаны преимущества и недостатки основных численных методов, используемых в системах автоматизированного проектирования для моделирования электромагнитных полей в трехмерных электродинамических структурах. В результате сравнения показано, что метод моментов позволяет выполнять моделирование существенно быстрее, но требует к машинным ресурсам, в то время как метод конечных разностей не подходит для расчета сильно связанных резонансных структур в виду существенных временных затрат на проведение моделирования.

Ключевые слова:

метаматериалы, частотно-селективные структуры, аналитический расчет, грибовидные структуры, структуры с отрицательными значениями ϵ и μ .

Введение

При разработке современных приборов и устройств СВЧ-диапазона важной частью конструкции становятся частотно-селективные поверхности, используемые в качестве специальных экранов, отражателей или же в качестве элементов фокусировки электромагнитного поля [1]. Особое место среди частотно-селективных поверхностей занимают метаматериалы – структуры, обладающие отрицательными действующими значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей [2]. Это свойство позволяет при помощи таких устройств добиться в определенном частотном диапазоне существенного улучшения свойств конструкций частотно-селективных поверхностей. Кроме того, малый размер элементарных ячеек метаматериала по сравнению с рабочей длиной волны делает их конструктивно удобными при проектировании различных устройств СВЧ.

Однако, на пути разработки структур на основе метаматериалов встает проблема их синтеза и расчета при помощи средств электродинамического моделирования, реализованных в современных системах автоматизированного проектирования (далее САПР). Размеры резонансных элементов этих конструкций много меньше рабочей длины волны. В то же время основные свойства структуры определяются характером взаимодействия структурных элементов между собой [3]. По этой причине при моделировании необходимо

проектировать структуру, состоящую из большого числа малых по размеру элементов, связанных между собой. Это приводит к тому, что при проведении компьютерного моделирования стандартными численными методами [2, 4] структура разбивается на большое количество элементов сетки, что приводит к необходимости использования значительных вычислительных ресурсов и существенным временным затратам на проведение расчета. Это делает невозможным синтез параметров элементарных ячеек метаматериала методом последовательных приближений при использовании средств электромагнитного моделирования. В связи с этим возникает задача оптимизации процесса расчета параметров метаматериалов и устройств на их основе с использованием средств электродинамического моделирования.

В виду большого многообразия типов метаматериалов рационально рассмотреть процесс оптимизации на примере одного из них. Одними из наиболее технологичных типов дважды отрицательных структур [5] является конструкция грибовидного метаматериала, предложенная Сивенпайпером [6, 7]. Она хорошо подходит для изготовления устройств на ее основе по технологии производства печатных плат или же методами LTCC керамик [8, 9]. Одним из наиболее популярных исполнений этой структуры является форма в виде мальтийского креста [10, 11]. Она позволяет одновременно обеспечить вариативность выбора емкостных и индуктивных параметров элементарной ячейки, что важно при проведении синтеза конструкции по заданным выходным параметрам.

В данной работе будут рассмотрены особенности проведения электродинамического моделирования параметров грибовидных метаматериалов с резонансными элементами в форме мальтийского креста и частотно-селективных устройств на их основе средствами специализированных САПР.

Конструкция ячейки грибовидного метаматериала

Конструкция грибовидного метаматериала была предложена в 1999 году Сивенпайпером [7]. Конструктивно этот материал представляет собой связанные друг с другом емкостной связью одинаковые по форме и размеру резонансные элементы с габаритами на много меньше рабочей длины волны, расположенные на общем диэлектрическом основании, причем каждый из резонансных элементов имеет омический контакт с общим металлическим экраном, расположенным с обратной стороны диэлектрической подложки. Такая конструкция по своей форме действительно похожа на гриб (рис. 1а), от чего эта структура и получил свое название.

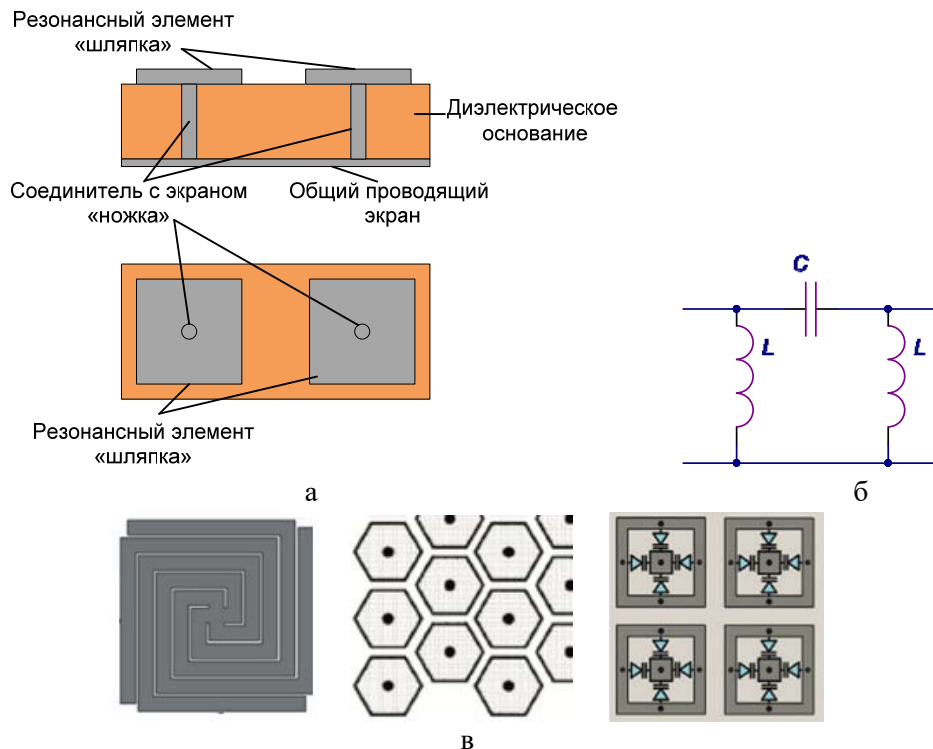


Рис. 1. Конструкция грибовидного метаматериала (а), его упрощенная эквивалентная схема (б) и некоторые варианты топологий элементов верхнего слоя (в)

Эквивалентная схема участка грибовидного метаматериала представляет собой фильтр верхних частот (ФВЧ) (рис. 1б). В этой схеме величина емкости определяется расстоянием между соседними резонансными элементами и шириной их смежных сторон, а индуктивность является суммой индуктивности проводника, обеспечивающего соединение «шляпки гриба» с общим экраном, а так же индуктивности топологии «шляпки гриба» (рис. 1в).

Большой интерес представляют конструкции резонансных элементов («шляпок») в форме мальтийского креста (рис. 2). Такая форма обеспечивает симметрию в ортогональных направлениях и широкие возможности по изменению собственных значений индуктивности и емкости путем изменения геометрических размеров топологии. К основным геометрическим параметрам, определяющим характеристики резонансного элемента следует отнести (рис. 2) размеры топологии верхнего слоя (a , b , c , e), диаметр переходного отверстия (d), расстояние между соседними элементами (g), а так же толщину металлизации (m – на рисунке не показана) и толщину диэлектрической подложки, определяющей длину переходного отверстия (h – на рисунке не показана). Задачей синтеза ячейки грибовидного метаматериала является определение значений геометрических размеров резонансного элемента, обеспечивающих резонанс на нужной рабочей частоте.

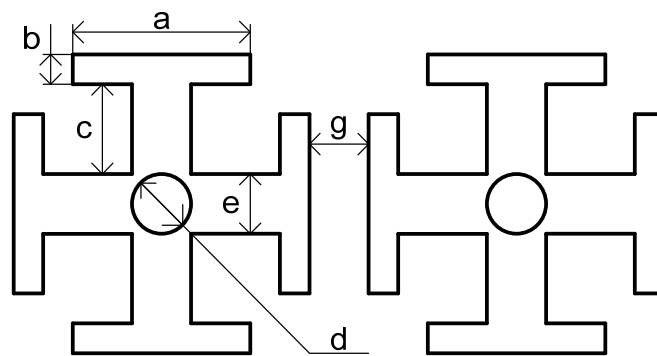


Рис. 2. Конструкция резонансного элемента в форме мальтийского креста

Для определения связи геометрических размеров резонансного элемента с собственными значениями индуктивности и емкости необходимо рассмотреть более подробную эквивалентную схему элементарной ячейки метаматериала (рис. 3) [12].

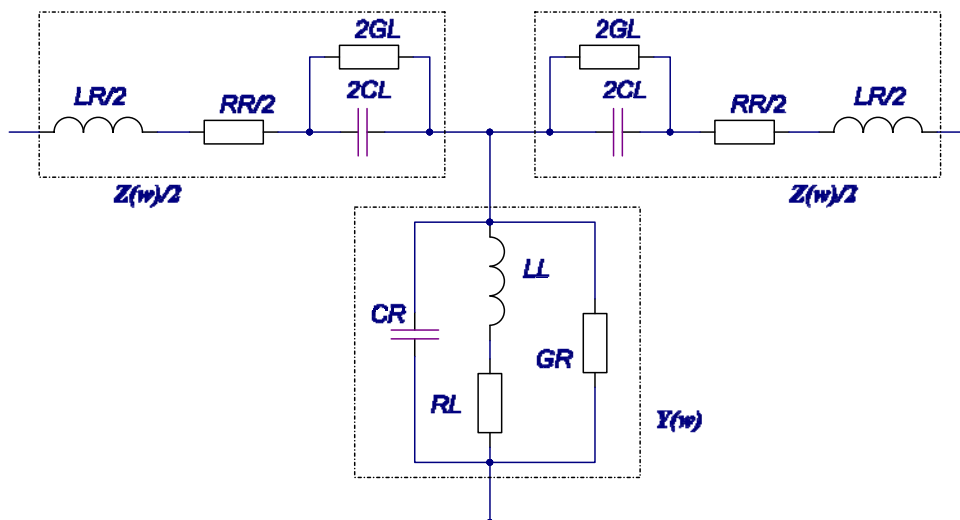


Рис. 3. Эквивалентная схема резонансного элемента элементарной ячейки грибовидного метаматериала

Каждая из сторон «креста» образует два последовательно соединенных участка топологии: шириной e и длиной c и шириной a и длиной b . Эти два участка формируют индуктивность L_R . Поскольку топология симметрична в ортогональных направлениях и имеет 4 одинаковые стороны, эти элементы образуют последовательное соединение. По этой причине на схеме они обозначены как $L_R/2$ (для более удобного восприятия схемы на ней показаны два луча креста, а не четыре с соответствующим изменением номиналов

элементов цепи). Резистор R_R отображает потери в индуктивности L_R . Между двумя соседними элементами формируется конденсатор C_L . Широкие оконечности лучей креста являются его обкладками шириной a и толщиной m (толщина металлизации), а расстояние между ними определяется зазором g . Таких конденсаторов так же образуется четыре, они так же соединены параллельно и по этой причине на схеме они обозначены как $2C_L$. Резистор G_L отображает потери в емкости C_L . Значение индуктивности L_L определяется геометрическими параметрами переходного отверстия – диаметром d и длиной, равной толщине подложки h . Резистор R_L отображает потери в индуктивности L_L . C_R является краевой емкостью относительно общего экрана и определяется толщиной подложки h и шириной края $a*4$ (поскольку у креста 4 луча). Резистор G_R отображает потери в емкости C_R . Исходя из этого, можно определить следующие зависимости параметров эквивалентной схемы от геометрических размеров резонансного элемента [13-15]:

$$C_L = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 am}{g}, \quad (1)$$

$$L_R = \frac{0.2}{c} \left(\ln \frac{m}{\varepsilon+m} + 1,193 + 0,2235 \frac{\varepsilon+m}{m} \right) + \frac{0.2}{b} \left(\ln \frac{m}{a+m} + 1,193 + 0,2235 \frac{a+m}{m} \right), \quad (2)$$

$$C_R = 1,47 \frac{h}{Z_0} \left[\frac{\frac{a*4}{h} + 0,22}{\frac{a*4}{h} + 0,88} \right] \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}, \quad (3)$$

$$L_L = \frac{h}{5} \left(1 + \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \right), \quad (4)$$

$$R_R = \rho \left(\frac{c}{\varepsilon m} + \frac{b}{am} \right), \quad (5)$$

$$R_L = \rho \frac{h}{\pi d^2/4}, \quad (6)$$

$$G_L = \rho_v \frac{g}{am}, \quad (7)$$

$$G_R = \rho_v \frac{h}{ab}, \quad (8)$$

где: ρ – удельное сопротивление проводника; ρ_v – удельное объемное сопротивление диэлектрика; ε – диэлектрическая проницаемость подложки; Z_0 – волновое сопротивление линии, образующей краевую емкость, определяемое по выражению (9); $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость, определяемая по выражению (10):

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \ln \left(\frac{8h}{a} + 0,25 \frac{a}{h} \right), \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{a} \right)^{-1/2} - \frac{\varepsilon-1}{4,6} \frac{m/h}{\sqrt{a/h}}, \quad (10)$$

Полученные выражения устанавливают связь между параметрами эквивалентной схемы элементарной ячейки метаматериала и геометрическими размерами ее топологии. В последующем эти связи могут быть учтены при оптимизации процесса расчета средствами САПР.

Современные методы численного моделирования

В современных САПР, специализированных на осуществлении расчетов двумерных, трехмерных и 2,5-D электромагнитных полей в основном используются три основных численных метода: метод моментов, метод конечных элементов в частотной области, метод конечных разностей во временной области [16, 17]. Иногда так же для решения задач электродинамики применяется метод интегральных уравнений [17]. Но он не подходит для анализа резонансных структур сложной формы и с высокой степенью связи между элементами топологии (коими и являются грибовидные метаматериалы) из-за большой размерности возникающих матриц для решения и, вследствие этого, низкой сходимости, что требует гораздо более суще-

ственных временных затрат для получения точного решения. По этой причине остановимся на рассмотрении первых трех методов.

Общим подходом при реализации работы как метода моментов, так и метода конечных элементов и метода конечных разностей в современных САПР является выполнение следующих основных шагов при подготовке модели структуры для анализа:

- Разбиение структура на элементарные участки. Как правило, это осуществляется на основе примитивов, использованных при построении модели пользователем. При этом должны быть соблюдены следующие правила:

- внутри элементарного участка может находиться элемент только из одного материала с заданными параметрами диэлектрической и магнитной проницаемости;

- любой элемент моделируемой структуры может быть отнесен только к одному элементарному участку даже если имеются пересечения между примитивами, из которых выполнена моделируемая конструкция (по этой причине участки пересечения примитивов в большинстве случаев определяются как отдельные элементарные участки).

- Определение границ между элементарными участками. При этом выделяются следующие виды границ:

- границы между участками с одинаковыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей материала;

- границы между участками с разными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей материала (границы перехода);

- границы, примыкающие к плоскостям, на которых заданы граничные условия (стенкам заданного объема моделирования, точкам подключения портов).

- Разбиение элементарных участков на элементы сетки моделирования. При этом выполняются следующие правила:

- элемент сетки должен полностью находиться внутри одного элементарного участка;

- размеры антенного элемента не должны превышать установленного в САПР (задается пользователем) значения кратности длины волны (как правило $1/10 \lambda$);

- на любой прямой линии, проложенной внутри элементарного участка вдоль основных осей координат (X , Y или Z) Должно располагаться не менее двух элементов сетки.

В результате такой подготовки вся структура представляется в виде плотной сетки из большого числа элементов, на границах части, из которых определены параметры электромагнитного поля (заданы граничные условия). Пример такого представления показан на рис. 4.

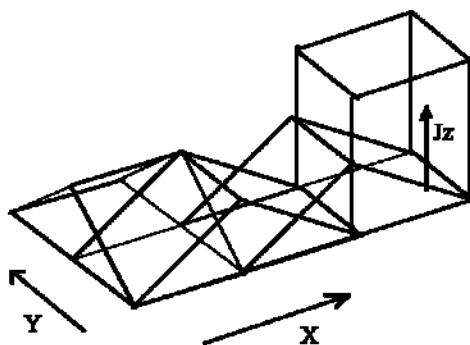


Рис. 4. Пример представления моделируемой структуры в виде сетки из элементарных ячеек.

Описание подготовки структуры к моделированию показывает, что время расчета при использовании того или другого метода, а также необходимые для расчета ресурсы персонального компьютера будут определяться не только скоростью сходимости и вычислительной сложностью самого метода, но и количеством элементов сетки, на которые будет разбита моделируемая структура. Для выбора оптимального метода для моделирования грибовидных метаматериалов проведем их сравнение по следующим параметрам: время на проведение 1 итерации расчета, количество элементов сетки, уровень загрузки центрального процессора (ЦП), уровень загрузки оперативной памяти (ОП), уровень загрузки жесткого диска (ЖД).

Результаты численного моделирования

Для проведения сравнительных расчетов была создана структура метаматериала с размерностью 10x10 ячеек для лучшего проявления резонансных свойств, представленная на рис. 5 и имеющая следующие параметры топологии элементарной ячейки:

- Ширина проводника креста – 0,05 мм;
- Длина луча креста – 5 мм;
- Ширина оконечности луча – 0,027 мм;
- Диаметр переходного отверстия – 1,38 мм.

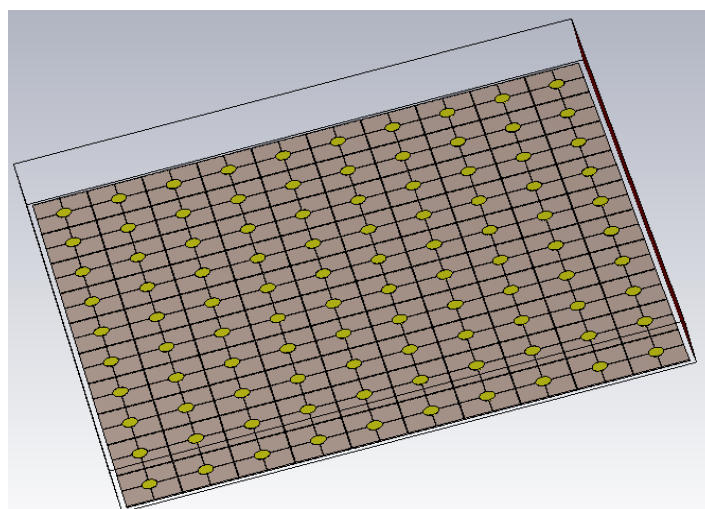


Рис. 5. Общий вид моделируемой конструкции метаматериала

Результаты расчетов этой структуры разными способами сведены в таблицу 1 и представлены на рис. 6.

Таблица 1

Сравнение методов математического моделирования

Метод	Время 1 итерации	К-во элементов сетки	Загрузка ЦП	Загрузка ОП	Загрузка ЖД
Метод моментов	97,9 с	845 325	74%	26%	92%
Метод конечных элементов	1386,4 с	323 418	74%	16%	12%
Метод конечных разностей	13457,4 с	4 888 324	67%	24%	7%

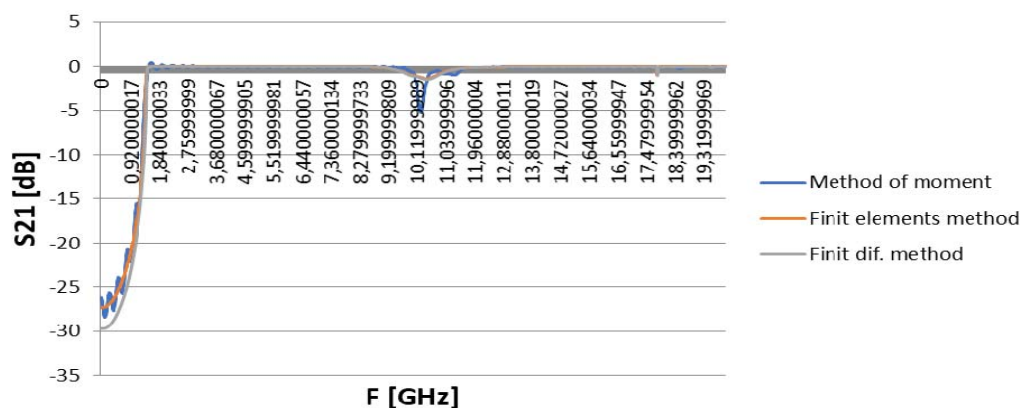


Рис. 6. Результаты моделирования коэффициента передачи структуры метаматериала

Анализ данных показывает, что все три метода показывают схожие результаты моделирования ячейки метаматериала. При этом метод моментов решает поставленную задачу существенно быстрее остальных, но требуя при этом существенно больше машинных ресурсов. Отдельно следует отметить, что на ПК, на котором проводились расчеты, использовался жесткий диск SSD. При использовании HDD жесткого диска

время моделирования увеличится примерно в десять раз. Высокая скорость работы метода моментов обеспечивается, в том числе, большим объемом использования жесткого диска для сохранения промежуточных результатов расчета. Такой режим работы вреден для жестких дисков формата SSD, которые имеют ограниченный ресурс чтения/записи. Таким образом, платой за скорость работы становится возможный выход из строя жесткого диска и необходимость резервирования системы.

В то же время, метод конечных элементов хоть и требует большего расчетного времени, существенно менее требователен к машинным ресурсам, и может быть использован даже на ПК со средними характеристиками. Метод конечных разностей не рекомендуется применять для расчета сильно связанных систем, поскольку время расчета существенно больше, чем у других методов при схожем с методом конечных элементов использовании ресурсов ПК.

Заключение

В работе показаны преимущества и недостатки основных численных методов, используемых в САПР для моделирования электромагнитных полей в трехмерных электродинамических структурах. Сравнение методов выполнено на примере расчета конструкции грибовидного метаматериала как системы с сильными связями и большим количеством резонансных элементов, размеры которых существенно меньше четверти длины волны. В результате сравнения показано, что метод моментов позволяет выполнять моделирование существенно быстрее, но требователен к машинным ресурсам, в то время как метод конечных разностей не подходит для расчета сильно связанных резонансных структур в виду существенных временных затрат на проведение моделирования.

Литература

1. *Luukkonen O.* Artificial impedance surfaces. Helsinki.: Picaset Oy, 2009. 80 p.
2. *Елизаров А. А., Кухаренко А. С.* Микроволновые частотно-селективные устройства на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структурах с метаматериалами. М.: Изд. Дом «Высшая школа экономики», 2019. 327 с.
3. *Engheta N., Ziolkowsky R. W.* Metamaterials. Physics and engineering exploration. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006.
4. *Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. Н.* Численные методы: учебное пособие для студентов физико-математических специальностей ВУЗов. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008.
5. *Engheta N., Ziolkowsky R. W.* Positive future of double-negative metamaterials // IEEE MTT transactions. 2005. Vol. 53. No. 4, pp. 1535-1556.
6. *Quarforth R., Sievenpiper D.* Broadband unit-cell design for highly anisotropic impedance surfaces // IEEE AP transactions – 2014. Vol. 62. No. 8, pp. 4143-4152.
7. *Sievenpiper D., Zhang L., Broas J., Alexopolous N. G., Yablonovich E.* High-impedance electromagnetic surface with a forbidden frequency band // IEEE MTT transactions. 1999. Vol. 47. No. 11, pp. 2059-2074.
8. *Кухаренко А. С., Елизаров А. А.* Практическое использование метаматериалов в конструкциях устройств СВЧ. Сборник статей по теме. Сарбрюкен, Германия: Издательство LAP Lambert academic publishing. 2016. 121 с.
9. *Кухаренко А.С.* Проектирование многослойных печатных плат для перестраиваемых частотно-селективных метаповерхностей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т.10. № 6. С. 62-68.
10. *Кухаренко А.С.* Исследование влияния частотно-селективного экрана на основе метаматериала на характеристики печатной антенны // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. №8. С. 94-99.
11. *Кухаренко А. С., Замурый Н. М., Кармеев Т. А., Воскресенская Е. А., Баймухаметова Д. М., Смирнова В. В.* Исследование возможности использования метаматериалов планарного типа для проектирования электронной линзы направленной антенны // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. №5. С. 49-64.
12. *Caloz C.* Metamaterial dispersion engineering concepts and Applications // IEEE Proceedings. 2011. Vol. 99. No. 10, pp. 1711-1719.
13. Проектирование полосковых устройств СВЧ. Учебное пособие. Ульяновск.: Издательство Ульяновского государственного технического университета, 2001. 123 с.
14. *Касаткин А. С., Немцов М. В.* Электротехника: учебник для ВУЗов. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 544 с.
15. *Иванов И. И.* Электротехника и основы электроники: учебник для СПО. СПб.: Лань, 2025. 736 с.
16. *Гринаев А. Ю., Гиголо А. И.* Математические основы и методы решения задач электродинамики: учебное пособие. М.: Радиотехника, 2015. 216 с.
17. *Вержебицкий В. М.* Основы численных методов: Учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 2005. 840 с.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Мальшев Александр Игоревич

Московский технический университет связи и информатики, магистрант, Москва, Россия
malyshev.aleksandr.2016@mail.ru

Чиров Денис Сергеевич

Московский технический университет связи и информатики, д.т.н., профессор, Москва, Россия

Аннотация

В статье рассматриваются технологии построения радиолиний для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и проводится анализ готовых решений по данной теме. Одной из основных проблем при построении радиолинии с БПЛА является многолучевое распространение сигнала. В статье приводятся основные методы обеспечения помехоустойчивости в каналах с эффектом многолучёвости.

Ключевые слова

БПЛА, многолучёвость, OFDM, самоорганизующаяся сеть, расширение спектра.

Введение

В настоящее время наблюдается развитие беспилотной авиации. Спрос на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с каждым годом растёт. По данным отчёта «Global Unmanned Aircraft Systems Market 2024–2033» от компании Custom market Insight мировой рынок беспилотных авиационных систем (БАС) к 2032 году достигнет объёма 100,4 миллиардов долларов со среднегодовым ростом 14,9%, а в России, по данным ассоциации «АЭРОНЕКСТ», рынок БАС может достигнуть 70 миллиардов рублей со среднегодовым темпом 38%.

БПЛА нашли применение во многих сферах человеческой деятельности, как в военной, так и в гражданской. Например, беспилотные системы применяются при контроле технического состояния различных объектов, мониторинга местности, спасении людей при ЧС [1]. БПЛА позволяют решать различные задачи в труднодоступных местах без непосредственного присутствия человека [15-18].

Анализ технологий связи с БПЛА

Для обеспечения связи с БПЛА необходим канал низкоскоростной командно-телеметрической радиолинии, которая отвечает за передачу команд управления с пункта управления (ПУ) на борт летательного аппарата и телеметрических данных с БПЛА на ПУ, и высокоскоростная информационная радиолиния, по которой передаются видеоданные в режиме реального времени с БПЛА на ПУ.

Сети радиосвязи с БПЛА различаются по топологии и методам доступа к частотно-временному ресурсу, выделенному для организации сети. Простейшей топологией построения линии связи с БПЛА является топология «точка-точка». В ней связь осуществляется между одним пунктом управления и одним летательным аппаратом.

Линия связи может быть организована двумя разными способами – с разделением приёма и передачи по частоте или по времени. Оба способа имеют одинаковую скорость передачи данных между источником и получателем информации, однако для организации канала с разделением приёма и передачи по времени, в радиотракте потребуется увеличить скорость на передачу в 2 раза в сравнении с частотным разделением, что повлечёт за собой необходимость увеличения энергетического потенциала радиолинии за счет соответствующего увеличения мощности передатчика и/или коэффициента усиления антенн. Вместе с тем, система с временным разделением обладает меньшей задержкой в сравнении с частотным [2].

В настоящее время широкое распространение получила топология сети связи с БПЛА «звезда». В ней обмен информацией происходит между одним пунктом управления и несколькими летательными аппаратами. Данная топология позволяет управлять сразу несколькими БПЛА, находящимися в воздухе.

На участке от ПУ к БПЛА, как правило, используется временное уплотнение (мультиплексирование) данных.

На участках от БПЛА к ПУ могут использоваться следующие основные методы доступа к частотно-временному ресурсу, выделенному для организации сети:

- частотный (FDMA), при котором каждому отдельному БПЛА в течение сеанса связи назначается свой частотный диапазон на передачу и на приём;
- временной (TDMA), при котором всем БПЛА в течение сеанса связи выделяется один и тот же частотный диапазон, однако, сеанс связи разделяется на временные интервалы, поочередно используемые различными БПЛА;
- кодовый (CDMA), при котором все БПЛА работают одновременно в одной и той же полосе частот с использованием ортогонального ансамбля сигналов (широкополосных сигналов с большой базой, или сигналов ППРЧ).

Использование TDMA позволяет сократить количество приёмно-передающего оборудования на пункте управления в сравнении с FDMA, но проигрывает системе с частотным доступом при заданном энергетическом потенциале радиолинии по скорости передачи и/или дальности связи. Кроме того, TDMA требует создания системы синхронизации всех БПЛА и ПУ по времени.

CDMA базируется на различные варианты формирования широкополосных сигналов (прямое расширение спектра, с использованием ансамбля из двух сигналов $M=2$, многопозиционное кодирование, при котором используется ансамбль ПСП содержащий $M \gg 2$ сигналов, фазовая и частотная модуляция символов ПСП). Одними из главных преимуществ использования методов расширения спектра является помехозащищённость и конфиденциальность системы, что позволяет противостоять преднамеренным помехам и перехвату данных.

Данный метод подходит для построения низкоскоростной командно-телеметрической линии связи, но не подходит для организации высокоскоростной линии передачи видеоданных, так как он приводит к существенному (в базу раз) увеличению требуемой полосы пропускания канала.

Основные требования по скорости передачи данных от бортовых целевых нагрузок зарубежных БПЛА различного назначения сформулированы в стандарте НАТО STANAG 4609 Edition 2 и во второй редакции "Руководства по реализации" этого стандарта AEDP-8 [3]. Обеспечение совместимости БПЛА и наземных пунктов управления регламентируется в странах НАТО стандартом STANAG 4586.

Одной из проблем организации канала связи является многолучевое распространение сигнала. В реальном канале на входе приёмника мы имеем основной сигнал и его отражённую копию, задержанную на некоторое время. Данное явление приводит к замираниям сигнала. К настоящему времени известны многочисленные разработки радиосредств для связи с БПЛА, базирующиеся на трёх основных вариантах выбора методов обеспечения помехоустойчивости в каналах с многолучевым распространением:

1. Традиционные методы минимизации негативных факторов многолучевости

Системы, соответствующие первому из приведенных вариантов, до настоящего времени достаточно широко применяются в зарубежных радиолиниях с БПЛА.

Характерными параметрами радиоканалов с методами модуляции сигналов одной несущей частоты в сочетании с эффективными бортовыми антенными системами, по опубликованным данным, являются [4]:

- скорость передачи данных до 22 Мбит/с на расстоянии 75 морских миль;
- 5 Мбит/с на расстоянии до 100 морских миль.

При больших дальностях, эффективность бортовых и наземных антенных систем недостаточны для устранения негативных факторов многолучевости. Одним из решений для уменьшения расстояния между приёмником и передатчиком является построение беспроводных самоорганизующихся сетей. В таких сетях устройства напрямую соединяются друг с другом, минуя центральную точку доступа или маршрутизатор, формируя временные, самоорганизующиеся структуры для обмена данными «на лету». Каждый узел сети пытается переслать данные, предназначенные другим узлам. При этом определение того, какому узлу переслать данные, производится динамически, на основании текущей связности сети.

При организации «традиционной» беспроводной сети, абоненты могут подключаться только к «базовым станциям», при организации самоорганизующихся сетей в качестве точки доступа для данного абонента может использоваться терминал соседнего радиовидимого абонента. Каждое из абонентских устройств, в зависимости от его мощности, обладает своим радиусом действия. Таким образом, можно сказать, что каждый новый абонент за счет своих ресурсов увеличивает радиус действия сети.

Преимуществом самоорганизующихся сетей является то, что расстояние между соседними точками доступа может быть достаточно мало, что позволит уменьшить мощность передатчика. Также из-за малых расстояний между терминалами уменьшается влияние эффекта многолучевости.

С другой стороны, каждый терминал помимо собственных данных должен маршрутизировать и транспортировать трафик других абонентов, что требует большей пропускной способности канала.

Одними из видов самоорганизующихся сетей являются [5]:

Mesh сети – радиосети ячеистой структуры, состоящие из беспроводных стационарных маршрутизаторов, которые создают беспроводную магистраль и зону обслуживания мобильных или стационарных абонентов, имеющих доступ к одному из маршрутизаторов в пределах зоны видимости. Топология таких MESH сетей – звезда, со случайным соединением опорных узлов

Ad-hoc сети – радиосети со случайными стационарными абонентами, реализующие полностью децентрализованное управление при отсутствии базовых станций или опорных узлов. Топология – фиксированная со случайным соединением узлов. Одной из разновидностью ad-hoc сети является топология **MANET (Mobile Ad hoc NETWORKS) сети** – радиосети со случайными мобильными абонентами, реализующие полностью децентрализованное управление при отсутствии базовых станций или опорных узлов. Топология – быстро меняющаяся со случайным соединением узлов.

WSN (Wireless Sensor Networks) – беспроводные сенсорные (телеметрические) сети, состоящие из малобаритных сенсорных узлов с интегрированными функциями мониторинга определенных параметров окружающей среды, обработки и передачи данных по радиоканалам. Они могут, в зависимости от задачи, строиться как по технологиям mesh, ad-hoc или MANET.

При построении самоорганизующихся сетей в настоящее время используются различные известные технологии и стандарты. Самыми популярными из них являются технологии Bluetooth (IEEE 802.15.1), ZigBee (IEEE 802.15.4) и Wi-Fi (IEEE 802.11) [5].

В [6] предлагается построение ad-hoc сети на базе протокола WiMAX с использованием малоразмерных БПЛА в местах природных и техногенных катастроф. Такие системы позволят оперативно обеспечить специальные службы, работающие в зоне возникновения аварии, связью.

2. Использование оптимизированных для каналов с многолучевым распространением методов модуляции и кодирования и упрощенных бортовых антенных систем

Аппаратурные комплексы, соответствующие второму варианту, с оптимизированными, для каналов с многолучевым распространением, методов модуляции и кодирования, в зарубежных радиолиниях с БПЛА базируются на различные варианты использования модуляции OFDM и COFDM.

Одним из первых проектов, в которых исследовалась возможность применения OFDM-модуляции на линии связи с БПЛА, является проект Minute Man, который финансировался отделом перспективных исследований ВМФ США (Office of Naval Research – ONR). Он реализовывался в 2000–2005 годы в лабораториях отделов электротехники и компьютерных наук Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) [4]. Целью проекта была разработка системы радиосвязи и обмена данными сил флота с беспилотными воздушными, надводными и наземными аппаратами.

В работе [7] представлены результаты реальных лётных испытаний. В ней сравнивается два способа построения канала передачи видеоданных с борта на наземный пункт управления – с ортогональным разнесением частот и канальным кодированием (COFDM) и модуляцией одной несущей по фазе (QPSK). Данные испытания проводились над водной поверхностью при близких погодных условиях.

Дальность передачи данных со скоростью 10 Мбит/с при модуляции одной несущей QPSK со скоростью кода 1/2 получилась дальность 260 км. При той же энергетике канала связи с использованием технологии COFDM был передан поток данных 26,9 Мбит/с (QAM-256, 1/2) на дальность 310 км.

Также в статье [7] рассматривается система передачи данных с ретранслятором. По результатам лётных испытаний получилось, что при использовании модуляции QPSK 1/2 одной несущей максимальное расстояние между двумя БПЛА составило 50 км, а при использовании технологии COFDM (QPSK 1/2) – 260 км.

Таким образом, по результатам лётных испытаний, приведённых в работе [7], следует, что технология COFDM даёт существенный выигрыш в дальности передачи информации при одинаковой энергетике.

Известные радиолинии с БПЛА с сигналами OFDM, организуются в частотных поддиапазонах от 0,9 до 6 ГГц. В сухопутных войсках НАТО появились системы связи, использующие военную версию стандарта IEEE 802.11g [4]. Этот стандарт предусматривает использование диапазона частот 2,4 ГГц, и может обеспечить, при слаборазнесенных антеннах БПЛА, скорости передачи до 54 Мбит/с на дальностях до 150 км.

В зарубежных радиолиниях с БПЛА используются различные версии стандарта IEEE 802.11a [8], диапазонов 5130–5150 МГц и 5470–6425 МГц. Максимальное число поднесущих частот для стандарта IEEE 802.11a, по сравнению со стандартом IEEE 802.16, сокращено с 2000, 4000 или 8000 (в зависимости от версии стандарта) до 485. При этом, существенно, по сравнению со стандартом IEEE 802.16, увеличена эффективная полоса сигнала – 160 МГц, вместо 8 МГц. Позиционность модуляции поднесущих доведена до

256-QAM (вместо 64-QAM) и несколько повышена эффективность системы помехоустойчивого кодирования (вместо сверточного кодирования по-Витерби, используется версия турбокодирования LDPS).

Базируясь на стандарт модуляции и кодирования IEEE 802.16-2004, американская компания Aerogix предлагает готовые модемные решения для двусторонней связи с БПЛА обеспечивающие в диапазонах 5,725-5,825 и 4,5-4,8 ГГц, на расстоянии до 75 морских миль скорость передачи данных от 12 до 65 Мбит/с [4]. Выпускается и мини-версия модема (802.16 EDL MiniDigitalDataLink) для снаряжения малых БПЛА.

В настоящее время для организации связи с БПЛА широкое распространение получили методы модуляции и кодирования, используемые в системах сотовой связи.

Так, например, в [9] предлагается использование технологии SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access), применяемой в стандарте LTE, для контроля и управления несколькими летательными аппаратами.

Данная технология позволяет обеспечить хорошую спектральную и энергетическую эффективность в передаче данных с ПУ на БПЛА. Также в статье [9] рассматриваются перспективы построения канала связи на частотах 5030-5091 МГц. По итогам расчёта в данном диапазоне частот можно реализовать линию связи на дальности до 100 км.

Ориентация аппаратуры радиосвязи с БПЛА на протоколы передачи и методы модуляции и кодирования, используемые в системах сотовой связи, позволяют:

- использовать наземную инфраструктуру сетей сотовой связи для увеличения дальности связи;
- существенно (по сравнению со специализированными комплексами аппаратуры) уменьшить стоимость аппаратуры.

3. Использование оптимизированных для каналов с многолучевым распространением методов модуляции и кодирования и эффективных бортовых антенных систем, обеспечивающих как повышение энергетического потенциала, так и организацию сетей с пространственным распределением трафика

В качестве примеров использования модуляции COFDM в сочетании с эффективными бортовыми антеннами на БПЛА, можно отметить аппаратуру фирмы CobhamSurveillance (GMS Products), диапазонов 1,7-1,85 и 1,99-2,5 ГГц на основе сигналов DVB-T с модуляцией COFDM и бортовой секторной шестигранной антенной решетки.

При использовании в этой аппаратуре 2048 поднесущих с центральной частотой 2,2 ГГц и модуляции поднесущих методом 16-QAM, по опубликованным данным, на дальностях до 150 км обеспечена скорость передачи до 12 Мбит/с, при скорости взаимного движения передатчика и приемника сигналов 280 км/ч.

Аппаратурный комплекс ARDS, немецкой фирмы «ОНВ System» в режиме COFDM имеет заявленную скорость передачи 83 Мбит/с на дальности до 250 км.

В статье [10] рассматривается построение высоконадёжной системы связи с БПЛА, основанную на совокупности использования наземных, воздушных и спутниковых ретрансляторов. Такой подход позволяет использовать преимущества каждого из перечисленных видов ретрансляции, что позволит повысить надёжность системы и обеспечить бесперебойную работу в любой точке [13]. Для обработки информации предлагается использование протоколов TCP/IP и SCADA. Для организации связи с БПЛА предлагается использование низкоскоростного радиоканала со скоростями 32-64 кбит/с для передачи служебной информации и команд управления с использованием четырёх малонаправленных антенн с диаграммами направленности 90° по азимуту каждая [14]. Для построения высокоскоростного канала предлагается использование оптической линии связи со скоростью передачи 100 Мбит/с с резервирование её же на радиочастоте со скоростью 25 Мбит/с с использованием остронаправленных антенных систем и с возможностью наведения по азимуту и углу-места.

В работе [11] предлагается использование БПЛА в качестве ретранслятора данных в труднодоступные районы, где нет возможности прокладки кабеля и установки базовой станции. Это позволит быстро и эффективно обеспечивать такие районы радиосвязью. Особенно это актуально при возникновении ЧС. Такой способ ретрансляции данных будет существенно дешевле, чем возведение сотовой вышки. По данным ассоциации «АЭРОНЕКСТ» [12] на 2024 год стоимость возведения сотовой вышки обходится от 5 до 30 миллионов рублей.

Заключение

Таким образом, внедрение БПЛА в различные сферы человеческой деятельности является актуальной задачей на сегодняшний день. Для передачи высокоскоростных видеоданных на большие расстояния эффективным решением является использование технологии OFDM.

По итогам обзора различных радиолиний, видно, что в настоящее время нет одной универсальной технологии построения канала связи с БПЛА. Каждая радиолиния строится исходя из конкретной задачи, что не позволяет создать унифицированную для БПЛА аппаратуру радиосвязи.

Для уменьшения стоимости аппаратуры, за счет повышения серийности производства, может использоваться технология программно-определяемого радио (SDR – Software-defined radio), обеспечивающая возможность адаптироваться под разные задачи. Возможности применения технологии SDR для создания унифицированной аппаратуры радиосвязи с БПЛА различных типов требует дополнительного рассмотрения.

Литература

1. Сташкевич С. П., Кабанов В. А., Хуснутдинов Т. Д., Кравченко А. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в военных и гражданских целях // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2019. Том 1.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Второе издание, исправленное. Глава 11 // Издательский дом «Вильямс» 2003 г.
3. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: Наука, Технология, Бизнес 3/2010.
4. Слюсар В. Радиолинии связи с БПЛА. Примеры реализации // Электроника: Наука, Технология, Бизнес 5. 2010.
5. Проскочило А.В., Воробьев А.В., Зряхов М.С., Кравчук А.С. Анализ состояния и перспективы развития самоорганизующихся сетей // Научные ведомости. Серия Экономика. Информатика. 2015. №19 (216). Выпуск 36/1.
6. Чертова О.Г., Чиров Д.С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Научные ведомости в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10269
7. Пантенков Д.Г., Загнетко М.А., Литвиненко В.П. Сравнительный анализ результатов лётных испытаний передачи высокоскоростной целевой информации с модуляцией QAM и OFDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 18. № 2. 2022.
8. IEEE Std 802.11ac™-2013.
9. Чиров Д.С., Иванкович М.В., Гололобов И.Л. Построение каналов связи с БПЛА среднего и дальнего радиуса действия // Журнал «Электросвязь», выпуск 4, 2025 г.
10. Пантелеймонов И.Н., Белозерцев А.В., Монастыренко А.А., Боцва В.В., Наумкин А.В. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. #6(723) 2020.
11. Марченко Е.М. Мобильная радиомачта на основе мультироторного БПЛА // Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, дипломная работа, 2024.
12. Ассоциация «АЭРОНЕКСТ». Связь без брака. Как создать эффективную инфраструктуру связи для беспилотных воздушных судов // 2024 г. Электронный ресурс: https://aeronext.aero/press_room/analytics/182565
13. Дементьев А. А., Чиров Д. С. Анализ существующих систем адаптивной подстройки параметров канала связи с БПЛА дальнего радиуса действия // Телекоммуникации и информационные технологии. 2024. Т. 11, № 2. С. 121-128. EDN BAFEJW.
14. Либеровский Н. Ю., Припутин В. С., Чиров Д. С. Обзор исследований адаптивного формирования диаграммы направленности и цифровой обработки сигналов // Научные ведомости в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13, № 6. С. 16-21. DOI 10.36724/2409-5419-2021-13-6-16-21. – EDN LFEEMB.
15. Кочкаров Р. А., Чиров Д. С., Тимошенко А. В., Казанцев А. М. Модель пространственно-распределенной информационной системы непрерывного мониторинга с предфрактальной динамической структурой в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 1. С. 4-12. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-1-4-12. EDN HAYRLG.
16. Timoshenko A. V., Perlov A. Yu., Chirov D. S., Zakharov A. S. Algorithm for assessing the readiness of a wideband radar for constructing radar portraits of space objects // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Vol. 19, No. 8, pp. 64-71. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-8-64-71. EDN HBCNXU.
17. Чиров Д. С., Марченков М. О. Анализ алгоритмов распознавания пожаров на изображениях, полученных оптико-электронной системой БПЛА // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2025. Т. 16, № 6. С. 23-26. EDN WXTLSW.
18. Болелов Э. А., Васильев О. В., Зябкин С. А., Чиров Д. С. Разработка нечетко-логического классификатора фазового состояния гидрометеоров для алгоритма классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в метеолокаторах х-диапазона // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 10. С. 4-12. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-10-4-12. EDN FSVTVQ.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МОМЕНТОВ, РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА И МНК В ЗАДАЧЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА M-QAM НА ФОНЕ ШУМА С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОШИ

Поборчая Наталья Евгеньевна

МТУСИ, д.т.н. профессор кафедры «Общая теория связи», Москва, Россия
n.poborchaya@mail.ru

Жарких Сергей Андреевич

МТУСИ, аспирант кафедры «Общая теория связи», Москва, Россия
zharkih-sergey@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены алгоритмы оценивания неизвестных параметров (амплитуды, фазы и сдвига частоты) сигнала квадратурной амплитудной модуляции (M-QAM) с известной (тестовой) последовательностью символов, наблюдаемого на фоне аддитивного шума с распределением Коши. Процедуры нахождения оценки синтезировались на основе следующих методов: метод моментов (медиана), рекуррентная нелинейная фильтрация Стратоновича (расширенный фильтр Калмана) и метод наименьших квадратов (МНК). Произведено сравнение точности оценивания, которую позволяют получить рассматриваемые алгоритмы. Получены экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от отношения сигнал / шум на бит при приеме сигнала 4-QAM на фоне шума Коши с использованием разных алгоритмов оценивания. Обсуждаются ограничения применимости моментов при негауссовском распределении шума, для которого математическое ожидание и дисперсия могут не существовать, что приводит к нестабильности и смещению оценок.

Ключевые слова:

оценка параметров сигнала, МНК, расширенный фильтр Калмана, метод моментов, распределение Коши, сигнал M-QAM.

Введение

Оценивание неизвестных параметров сигнала является хорошо изученной темой. Чаще всего для решения задачи нахождения оценок используются критерии максимального правдоподобия, минимальной средней квадратической ошибки (СКО), максимальной апостериорной плотности распределения вероятности [1-4]. Все они требуют знания законов распределения шумов. Адекватной моделью последних во многих реальных ситуациях являются мешающие воздействия с гауссовским распределением, что объясняется выполнением центральной предельной теоремы теории вероятностей (ЦПТ). Кроме того, при гауссовских случайных процессах можно получить достаточно простые алгоритмы оценивания неизвестных параметров принимаемого сигнала. Однако, не всегда реальные шумы подчиняются нормальному закону распределения [5-8]. Функции плотности распределения вероятности (ФПВ) реальных процессов в некоторых случаях имеют «тяжелые хвосты». В [6] показано, что в некоторых случаях распределения с бесконечной дисперсией могут более адекватно описывать шумовые процессы, чем гауссовское, несмотря на то что мощность любого физического процесса ограничена. Примером такого закона является распределение Коши. Поэтому в настоящей работе исследуется прием сигнала M-QAM на фоне аддитивного шума с данной ФПВ.

Постановка задачи. Рассмотрим квадратуры сигнала M-QAM z_{ci}, z_{si} , наблюдаемые на фоне аддитивного белого негауссовского шума μ_{ci}, μ_{si} :

$$y_{ci} = z_{ci} + \mu_{ci}, y_{si} = z_{si} + \mu_{si}, \quad (1)$$

где шумовые составляющие распределены по закону Коши:

$$w_\mu(x) = \frac{1}{\pi b \left(1 + \frac{x^2}{b^2}\right)}, \quad b - \text{параметр масштаба [9, 10],}$$

$$z_{ci} = \Phi_{ci}(\Theta_i) = A_i \cos(2\pi\Delta f_i T_c i + \varphi_i) I_i - A_i \sin(2\pi\Delta f_i T_c i + \varphi_i) J_i,$$

$$z_{si} = \Phi_{si}(\Theta_i) = A_i \sin(2\pi\Delta f_i T_c i + \varphi_i) I_i + A_i \cos(2\pi\Delta f_i T_c i + \varphi_i) J_i, \quad (2)$$

$\Theta_i = (A_i \quad \Delta f_i \quad \varphi_i)^T$; A_i – амплитуда, Δf_i – сдвиг частоты и $\varphi_i = \varphi_0 + \zeta_{\varphi_i}$ – фаза сигнала (φ_0 – начальная фаза, ζ_{φ_i} – фазовый шум), «Г» – оператор транспонирования, $i = 1, 2, \dots$ – дискретное время, T_c – длительность тестовых или информационных символов I_i, J_i .

Требуется, наблюдая выборку квадратур сигнала y_{ci}, y_{si} объемом m с известной тестовой последовательностью I_i, J_i , найти оценку $\hat{\Theta}_i$ вектора параметров Θ_i с помощью алгоритмов, основанных на методе моментов, рекуррентной нелинейной фильтрации и МНК, а затем произвести процедуру детектирования информационных символов на интервале времени длиной n в два этапа: получение 1) мягких решений, 2) жестких решений, используя критерий минимального расстояния между найденными мягкими решениями и возможными значениями символов.

Решение задачи. Будем предполагать, что параметры сигнала меняются медленно, т.е. за время их оценивания и дальнейшего детектирования информационных символов $A_i = A, \Delta f_i = \Delta f$. Так как модель фазового шума ζ_{φ_i} неизвестна, то оцениванию подлежит только его постоянная составляющая $\varphi_0 = \varphi$. Тогда $\Theta_i = \Theta = (A \quad \Delta f \quad \varphi)^T$.

Задача оценивания неизвестных параметров. Рассмотрим три метода оценивания: метод моментов (медиана), нелинейная рекуррентная фильтрация и МНК.

1) Метод моментов. Пусть известно теоретическое значение медианы $\nu = med$ амплитуды $\sqrt{\mu_{ci}^2 + \mu_{si}^2}$ шума или его оценка, найденная по выборке объемом m . Здесь в методе моментов использована медиана, т.к. она позволяет получить более точные оценки параметров сигнала, чем среднее значение, что отражено в работах [11-14, 19-23], кроме того, медиана амплитуды, образованная с помощью случайных величин с распределением Коши, существует и определяется по формуле

$$\nu = b \sqrt{\operatorname{tg}^2\left(\frac{3\pi}{8}\right) - 1} \cong 2.2b \quad (3)$$

Вывод выражения (3) дан в приложении.

Тогда, используя метод моментов, запишем выражения для оценок:

$$\hat{\Theta}_l = \hat{\Theta}_{l-1} + \mathbf{K}_l (m\nu - S(\hat{\Theta}_{l-1})), \quad l = 1, \dots, L_0, \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_l = \lambda_l \mathbf{R}_l \mathbf{d}_{l-1,1}^T (\mathbf{d}_{l-1,1} \mathbf{R}_l \mathbf{d}_{l-1,1}^T \lambda_l + \sigma_\varepsilon^2)^{-1}, \quad \mathbf{R}_l = \mathbf{G}_{l-1} + \sigma_\xi^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \quad \mathbf{G}_l \approx \mathbf{R}_l - \mathbf{K}_l \mathbf{d}_{l-1,1} \mathbf{R}_l,$$

регуляризирующий множитель Лагранжа определяется как:

$$\lambda_l = \frac{\sqrt{u_l + 1} - 1}{u_l}, \quad u_l = \frac{\mathbf{d}_{l-1,1} \mathbf{R}_l \mathbf{d}_{l-1,1}^T}{\sigma_\varepsilon^2}. \quad (5)$$

Начальные условия: $\mathbf{G}_0 = \sigma_\varepsilon^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}$, $\hat{\Theta}_0 = (\hat{A}_0 \quad \hat{\Delta f}_0 \quad \hat{\varphi}_0)^T = (1 \quad 0 \quad 0)^T$.

Здесь l – номер итерации алгоритма (4), (5); $S(\Theta) = \sum_{i=1}^m S_i(\Theta)$,
 $S_i(\Theta) = a_i = \sqrt{(y_{ci} - \Phi_{ci}(\Theta))^2 + (y_{si} - \Phi_{si}(\Theta))^2}$ (см. модель (1) и (2)); σ_ε^2 – дисперсия ошибки между значением оценки mV и функцией $S(\Theta)$; $\mathbf{d}_{l-1,1} = S'(\hat{\Theta}_{l-1}) = \left(S'(\hat{A}_{l-1}) \quad S'(\hat{\Delta f}_{l-1}) \quad S'(\hat{\varphi}_{l-1}) \right)_{1 \times 3}$,
 $S'(\hat{\Theta}_{l-1})$ – первая производная функции $S(\cdot)$ в точке $\hat{\Theta}_{l-1}$; $\sigma_\xi^2 \rightarrow 0$, $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ – единичная матрица размером 3×3 .

2) *Расширенный фильтр Калмана (нелинейная фильтрация Стратоновича)* [15, 16].

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}_i &= \hat{\Theta}_{i-1} + \mathbf{K}_i (\mathbf{Y}_i - \Phi_i(\hat{\Theta}_{i-1})), i = 1, 2, \dots, m \\ \mathbf{K}_i &= \mathbf{P}_i \mathbf{D}_{li}^T (\mathbf{D}_{li} \mathbf{P}_i \mathbf{D}_{li}^T + \mathbf{Q})^{-1}, \mathbf{P}_i = \Gamma_i + \mathbf{B}, \Gamma_i = \mathbf{P}_i - \mathbf{K}_i \mathbf{D}_{li} \mathbf{P}_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\hat{\Theta}_i = \left(\hat{A}_i \quad \hat{\Delta f}_i \quad \hat{\varphi}_i \right)^T$, $\mathbf{Y}_i = (y_{ci} \quad y_{si})^T$, $\Phi_i(\hat{\Theta}_{i-1}) = \left(\Phi_{ci}(\hat{\Theta}_{i-1}) \quad \Phi_{si}(\hat{\Theta}_{i-1}) \right)^T$ (с учетом моделей (1), (2)),
 $\Gamma_i = E(\Theta_i - \hat{\Theta}_i)(\Theta_i - \hat{\Theta}_i)^T$ – ковариационная матрица ошибки фильтрации, $\mathbf{D}_{li} = \Phi_i'(\hat{\Theta}_{i-1})$ – первая производная вектор-функции $\Phi_i(\cdot)$ в точке $\hat{\Theta}_{i-1} = \left(\hat{A}_{i-1} \quad \hat{\Delta f}_{i-1} \quad \hat{\varphi}_{i-1} \right)^T$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sigma_{\xi A}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\xi \Delta f}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\xi \varphi}^2 \end{pmatrix}$,

$\mathbf{Q} = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2 \times 2}$, « T » – операция транспонирования. Начальные условия:

$$\hat{\Theta}_0 = \left(\hat{A}_0 \quad \hat{\Delta f}_0 \quad \hat{\varphi}_0 \right)^T = (1 \quad 0 \quad 0)^T, \Gamma_0 = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}.$$

В конце работы алгоритма (6) осуществляется пересчет оценок сдвига частоты и фазы следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \hat{\Delta f} \\ \hat{\varphi} \end{pmatrix} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \hat{\Psi}, \quad (7)$$

$$\text{где } \hat{\Psi} = \begin{pmatrix} \hat{\psi}_k \\ \hat{\psi}_{k+1} \\ \vdots \\ \hat{\psi}_m \end{pmatrix}_{(m-k+1) \times 1}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 2\pi T_c k & 1 \\ 2\pi T_c (k+1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 2\pi T_c (m+1) & 1 \end{pmatrix}_{(m-k+1) \times 2}, \hat{\psi}_i = 2\pi \hat{\Delta f}_i T_c i + \hat{\varphi}_i, i = k, k+1, \dots, m.$$

3) *Метод наименьших квадратов (МНК)* [17, 18]. Рассмотрим модель (1), (2). Для нее запишем функционал, по которому будем определять оценки неизвестных параметров сигнала:

$$L(\Theta) = \sum_{i=1}^m \left[(y_{ci} - \Phi_{ci}(\Theta))^2 + (y_{si} - \Phi_{si}(\Theta))^2 \right], \Theta = (A \quad \Delta f \quad \varphi)^T.$$

Тогда критерий оценивания имеет следующий вид:

$$\left(\hat{A}, \hat{\Delta f}, \hat{\varphi} \right) = \arg \min L(A, \Delta f, \varphi) \quad (8)$$

Достоинством такого подхода является возможность производить нахождение значений параметров сигнала в условиях неизвестных законов распределения мешающего воздействия и его моментов.

Критерий (8) приводит к следующим выражениям для оценок сдвига частоты, фазы и амплитуды:

$$\Delta\hat{f}_k = \Delta\hat{f}_{k-1} - \left[F'(\Delta\hat{f}_{k-1}) \right]^{-1} F(\Delta\hat{f}_{k-1}), k = 1, 2, \dots, K_0, \quad (9)$$

$$F(\Delta\hat{f}_{k-1}) = \sum_{i=1}^m \hat{V}_{i,k-1} \sum_{i=1}^m i \hat{R}_{i,k-1} - \sum_{i=1}^m \hat{R}_{i,k-1} \sum_{i=1}^m i \hat{V}_{i,k-1},$$

$$F'(\Delta\hat{f}_{k-1}) = 2\pi T_c \left[\left(\sum_{i=1}^m i \hat{R}_{i,k-1} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m i \hat{V}_{i,k-1} \right)^2 - \sum_{i=1}^m \hat{V}_{i,k-1} \sum_{i=1}^m i^2 \hat{V}_{i,k-1} - \sum_{i=1}^m \hat{R}_{i,k-1} \sum_{i=1}^m i^2 \hat{R}_{i,k-1} \right],$$

$$\hat{V}_{i,k-1} = \sin(2\pi\Delta\hat{f}_{k-1} T_c i) B_i - \cos(2\pi\Delta\hat{f}_{k-1} T_c i) C_i,$$

$$\hat{R}_{i,k-1} = \sin(2\pi\Delta\hat{f}_{k-1} T_c i) C_i + \cos(2\pi\Delta\hat{f}_{k-1} T_c i) B_i,$$

$$B_i = y_{ci} I_i + y_{si} J_i, C_i = y_{si} I_i - y_{ci} J_i$$

начальное условие: $\Delta\hat{f}_0 = 0$;

$$\hat{\varphi} = -\arctg \left(\frac{\sum_{i=1}^m V_i}{\sum_{i=1}^m R_i} \right), \quad (10)$$

$$V_i = \sin(2\pi\Delta\hat{f}_{K_0} T_c i) B_i - \cos(2\pi\Delta\hat{f}_{K_0} T_c i) C_i, R_i = \sin(2\pi\Delta\hat{f}_{K_0} T_c i) C_i + \cos(2\pi\Delta\hat{f}_{K_0} T_c i) B_i$$

$$\hat{A} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (I_i^2 + J_i^2)} \sum_{i=1}^m [\cos(\hat{\Psi}_i) B_i + \sin(\hat{\Psi}_i) C_i], \quad (11)$$

$$\hat{\Psi}_i = 2\pi\Delta\hat{f}_{K_0} T_c i + \hat{\varphi}.$$

Замечание: для нахождения оценки сдвига частоты был использован метод Ньютона решения нелинейного уравнения.

Задача детектирования. По полученным оценкам амплитуды, фазы и сдвига частоты с помощью рассмотренных выше алгоритмов сформируем экстраполированную матрицу канала связи:

$$\tilde{\mathbf{H}}_i = \hat{A} \begin{pmatrix} \cos(2\pi\Delta\hat{f} T_c i + \hat{\varphi}) & -\sin(2\pi\Delta\hat{f} T_c i + \hat{\varphi}) \\ \sin(2\pi\Delta\hat{f} T_c i + \hat{\varphi}) & \cos(2\pi\Delta\hat{f} T_c i + \hat{\varphi}) \end{pmatrix}, i = m+1, \dots, m+n.$$

Затем находим мягкие решения: $\mathbf{r}_i = \tilde{\mathbf{H}}_i^{-1} \mathbf{y}_i$, где $\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} r_{ci} \\ r_{si} \end{pmatrix}$, $\mathbf{y}_i = \begin{pmatrix} y_{ci} \\ y_{si} \end{pmatrix}$.

Процедура детектирования информационной последовательности символов производилась по критерию минимального расстояния между мягким решением r_{ci}, r_{si} и возможными значениями символов I_{0q}, J_{0k} , $q = (2q-1-\sqrt{M})d_0$, $k = (2k-1-\sqrt{M})d_0$, $q = 1, 2, \dots, \sqrt{M}$, d_0 – расстояние между двумя соседними точками созвездия сигнала:

$$(\hat{I}_i, \hat{J}_i) = \arg \min_{\mathbf{X}_0(q,k)} \|\mathbf{r}_i - \mathbf{X}_0(q,k)\|^2, \mathbf{X}_0(q,k) = \begin{pmatrix} I_{0q} \\ J_{0k} \end{pmatrix}.$$

Вычислительный эксперимент. Аддитивный шум в модели (1), распределенный по закону Коши, моделировался, как функция от равномерно распределенной на интервале от 0 до 1 случайной величины η : $\mu = b \cdot \text{tg}(\pi(\eta - 0.5))$.

На рисунке 1 показана ФПВ случайной величины μ $w_\mu(x)$ с параметром масштаба b и выборочной дисперсией $\hat{\sigma}_K^2$, полученной по выборке объемом m , и гауссовская ФПВ с дисперсией σ_T^2 при $b = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_T \cdot \hat{\sigma}_K$ была получена, так как теоретическая дисперсия величины, распределенной по

Коши равна бесконечности. Рисунок 2 иллюстрирует выборочные оценки среднего значения, дисперсии и огибающей гауссовского шума и шума Коши.

Из рисунка 1 видно, что ФПВ Коши визуально похоже на гауссовскую, но с более тяжелыми хвостами. Исходя из рисунка 2, можно сделать вывод, что при увеличении объема выборки шумового процесса выборочные оценки не дают установившихся значений для математического ожидания, дисперсии и среднего значения огибающей у распределения Коши (рис. 2а), как это происходит у шума с нормальным законом распределения (рис. 2б). Поэтому в дальнейшем при использовании метода моментов для оценивания неизвестных параметров QAM-сигнала использовалась медиана U огибающей.

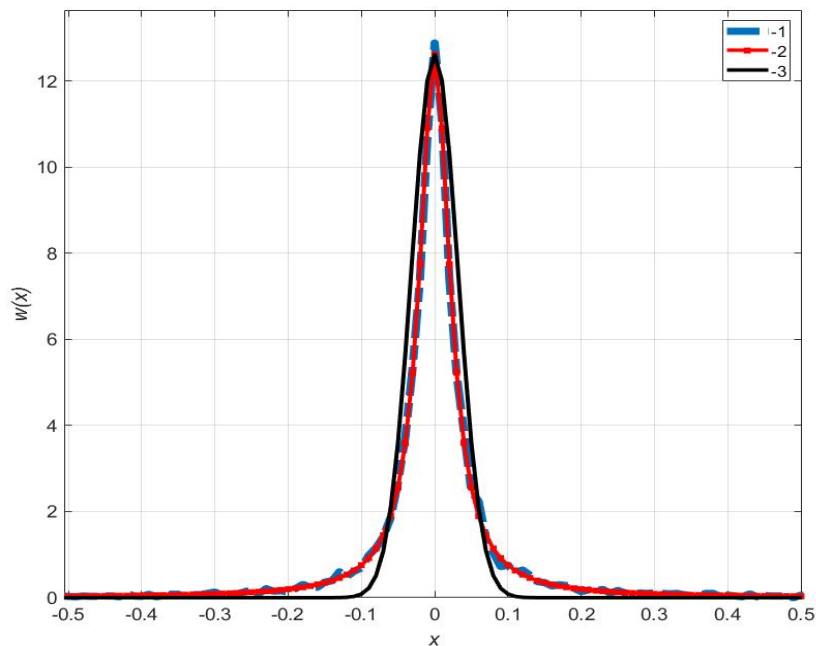


Рис. 1. ФПВ гауссовской случайной величины и величины, распределенной по Коши:

- 1 – оценка ФПВ случайной величины с распределением Коши по выборке объемом $n = 1000$ (нормированная гистограмма);
- 2 – теоретическая ФПВ Коши с параметров масштаба $b = 0.0252$, ($\hat{\sigma}_K^2 = 371.2$, $m = 1000$);
- 3 – теоретическая ФПВ гауссовской величины с дисперсией $\sigma_T^2 = 10^{-3}$

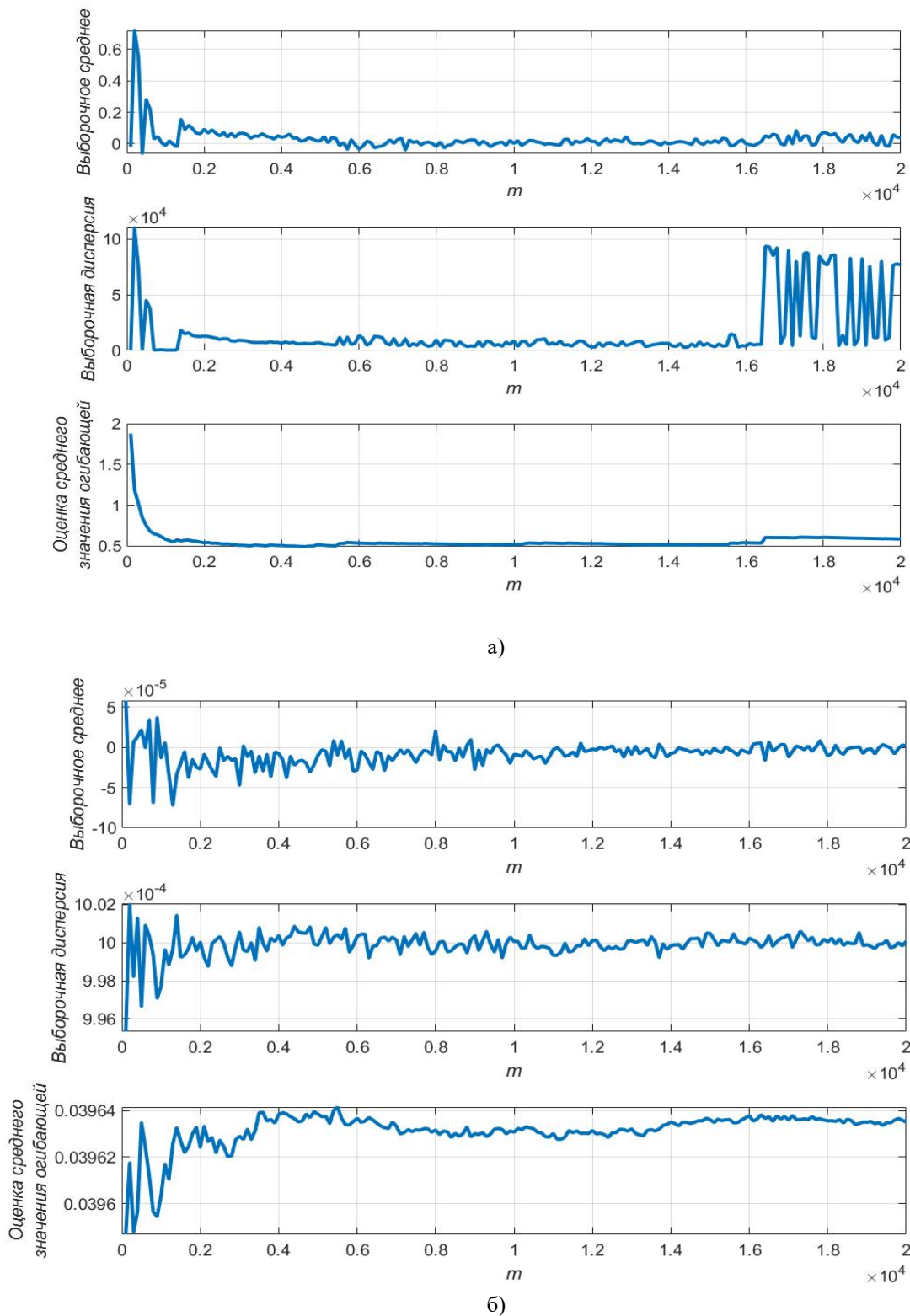


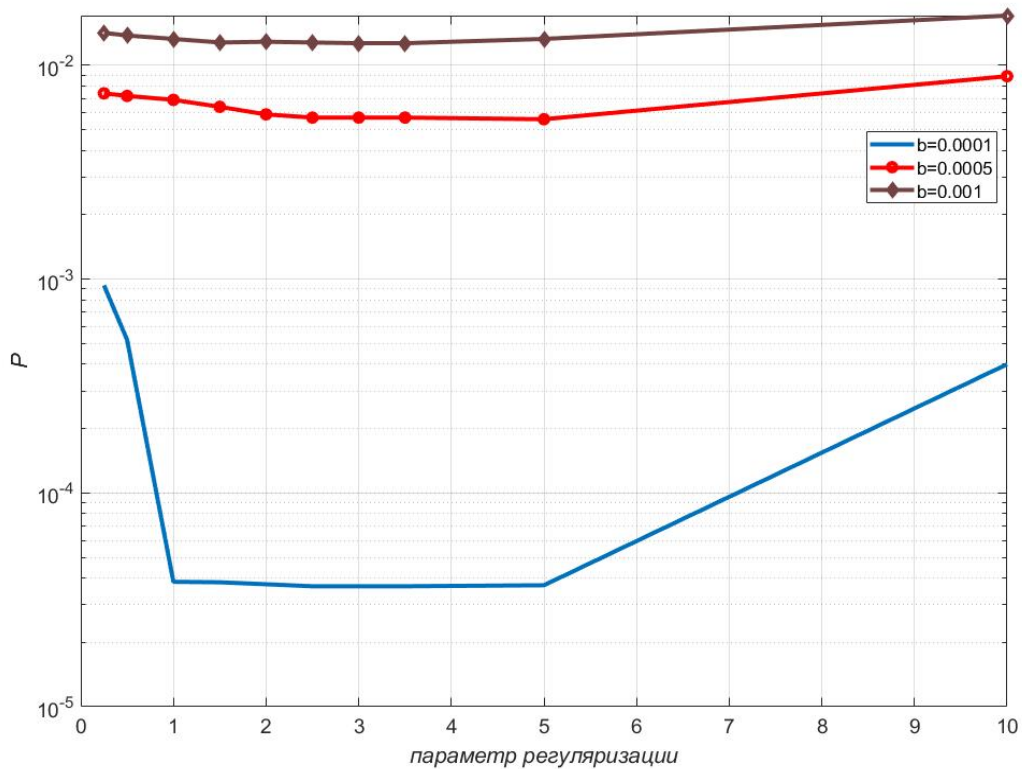
Рис. 2. Выборочные оценки среднего значения, дисперсии аддитивного шума, а также оценка среднего значения огибающей: а – распределение Коши; б – гауссовское распределение

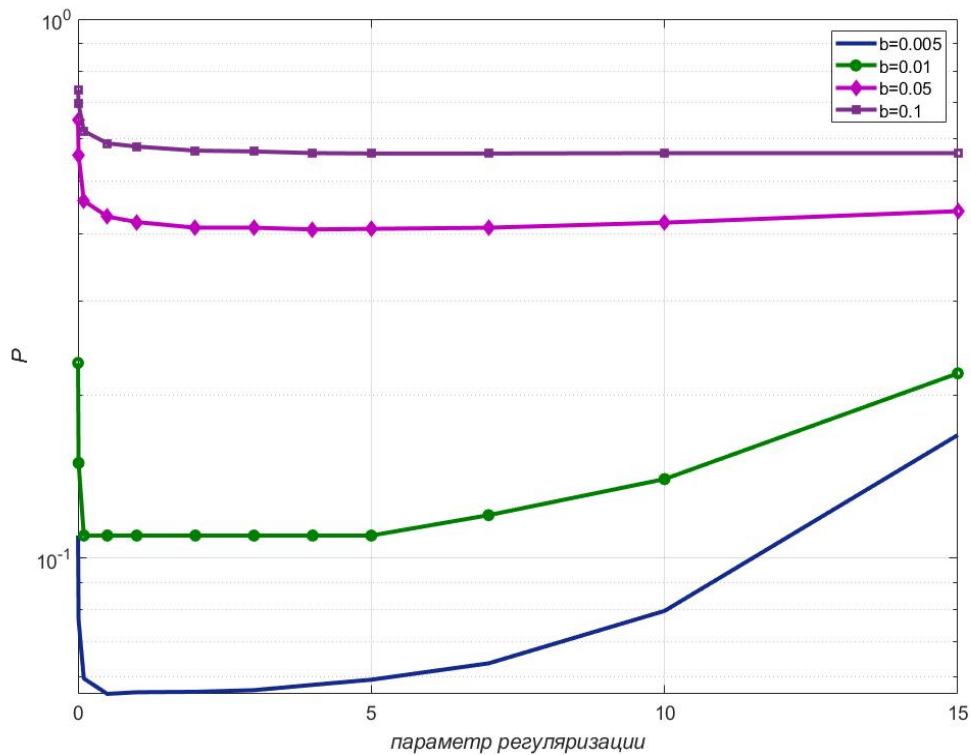
Моделирование алгоритмов оценивания и детектирования на ЭВМ производилось при следующих данных: принимался сигнал 4-QAM ($M=4$); параметры модели (2) следующие: амплитуда сигнала $A=3$, сдвиг частоты $\Delta f = 500$ Гц, фаза моделировалась с помощью скользящего среднего (СС)

первого порядка: $\varphi_i = \varphi_0 + b_0\alpha_i + b_1\alpha_{i-1}$, где α_i – белый гауссовский шум с $E(\alpha_i) = 0, E(\alpha_i^2) = \sigma_\alpha^2$, b_0, b_1 – коэффициенты уравнения СС, $\sigma_\alpha^2 = 3 \cdot 10^{-4}$, $b_0 = 1, b_1 = -0.1$ (такие значения обеспечивают СКО фазового шума равным одному градусу); φ_0 – начальная случайная фаза сигнала, распределенная равномерно на интервале $[-\pi; \pi]$; интервал дискретизации сигнала равен длине T_c тестового символа I_i, J_i ($T_c = 0.25$ мкс); длина тестового сигнала $m = 500$, информационного – $n = 10000$; число итераций в алгоритме (4), (5) $L_0 = 1000$, в алгоритме (9) $K_0 = 20$, в процедуре расширенного фильтра Калмана равно объему выборки тестовой последовательности m , количество их повторений $N=500$. Постоянные в алгоритмах оценивания имели значения: для (4), (5) $\sigma_\varepsilon^2 = 0.1, \sigma_\xi^2 = 10^{-8}$, для процедуры расширенного фильтра Калмана (6) $\sigma_{\xi A}^2 = \sigma_{\xi \Delta}^2 = 10^{-5}, \sigma_{\xi \varphi}^2 = 3 \cdot 10^{-4}, \sigma_\mu^2 = \sigma^2, k = 40$. Параметр σ^2 использовался вместо дисперсии аддитивного мешающего воздействия и подбирался экспериментально, так как дисперсия σ_μ^2 шума Коши бесконечна, а ее выборочное значение сильно зависит от объема выборки сигнала, что затрудняет ее использование в алгоритме.

На рисунке 3 показаны экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от параметра σ^2 при приеме сигнала 4-QAM на фоне шума Коши с разным параметром масштаба b .

Из рисунка 3 видно, что при определенных значениях $\sigma^2 = \sigma_0^2$ вероятности ошибки принимают минимальные значения. Поэтому для реализации алгоритма расширенного фильтра Калмана (6), (7) были взяты свои значения $\sigma_\mu^2 = \sigma_0^2$ для каждого b .





б)

Рис. 3. Экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от значения параметра регуляризации при приеме сигнала 4-QAM с объемом выборки $n = 10\,000$ на фоне шума Коши с разным параметром масштаба b с использованием расширенного фильтра Калмана для оценивания неизвестных параметров сигнала по тестовой последовательности длиной $m = 500$: $b = 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$; 10^{-3} (а); $b = 5 \cdot 10^{-3}$; 10^{-2} ; $5 \cdot 10^{-2}$; 10^{-1} (б)

На рисунке 4 изображены экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от значений b при приеме сигнала 4-QAM. Значения медианы в алгоритме (4) вычислялось по формуле (3).

В таблице 1 даны теоретические значения медианы ν (3) и ее оценки $\hat{\nu}$, полученные по выборке случайной величины a объемом $m = 500$.

Таблица 1

Значения медианы огибающей при разных значениях параметра масштаба b распределения Коши

b	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
ν	$2.197 \cdot 10^{-4}$	$1.099 \cdot 10^{-3}$	$2.197 \cdot 10^{-3}$	$1.009 \cdot 10^{-2}$	$2.197 \cdot 10^{-2}$	$1.009 \cdot 10^{-1}$	$2.197 \cdot 10^{-1}$
$\hat{\nu}$	$2.201 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$2.201 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$2.201 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$2.201 \cdot 10^{-1}$

Из таблицы 1 видно, что относительная погрешность оценки медианы огибающей составляет $\delta_a = \frac{|\nu - \hat{\nu}|}{\nu} = 9.1 \cdot 10^{-4} \div 1.8 \cdot 10^{-3}$, что говорит о верности формулы (3) и корректности эксперимента.

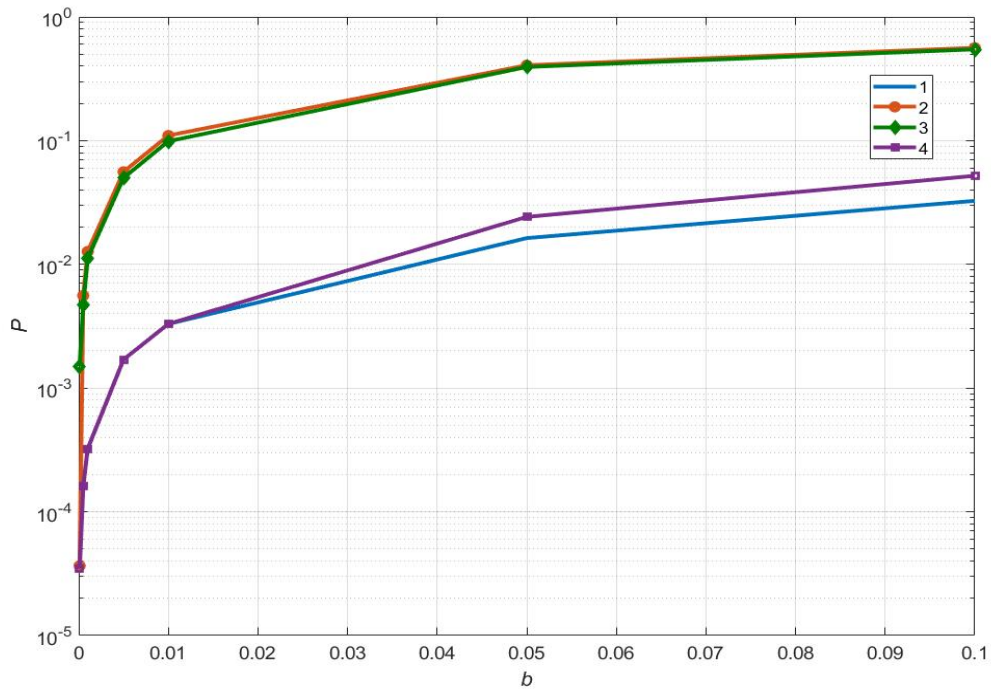


Рис. 4. Экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от параметра масштаба ФПВ шума Коши при приеме сигнала 4-QAM с объемом выборки $n = 10000$ с использованием разных алгоритмов оценивания неизвестных параметров по тестовой последовательности длиной $m = 500$: 1 – при точно известных параметрах сигнала кроме фазового шума; 2 – алгоритм расширенного фильтра Калмана; 3 – алгоритм МНК; 4 – метод моментов (медиана)

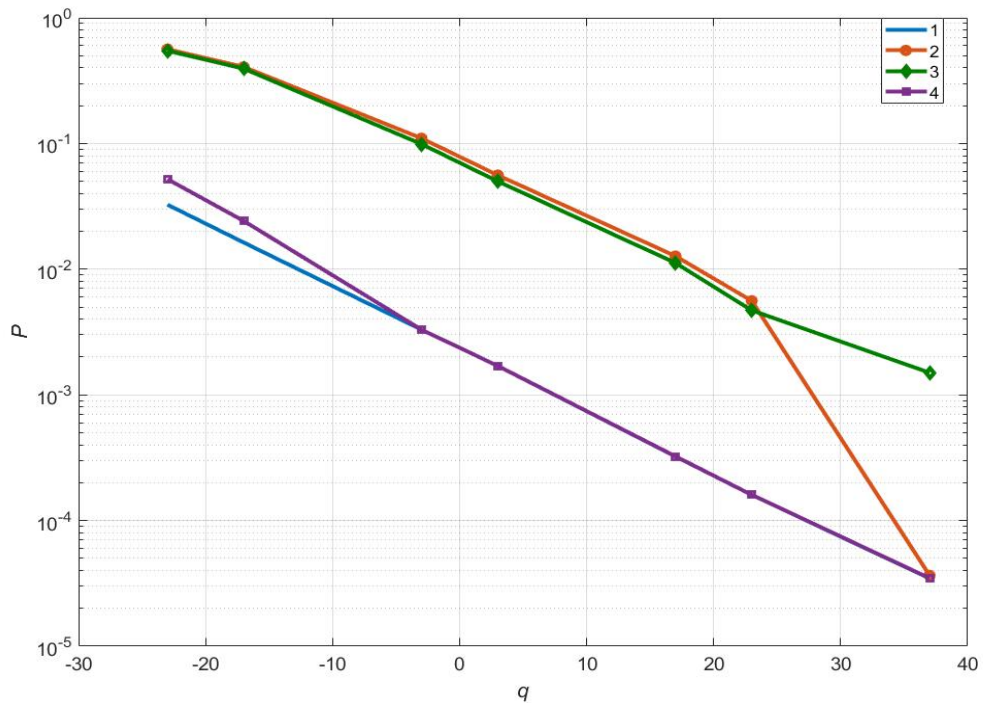


Рис. 5. Экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от ОСШ на бит при приеме сигнала 4-QAM с объемом выборки $n = 10\ 000$ на фоне шума Коши с использованием разных алгоритмов оценивания неизвестных параметров по тестовой последовательности длиной $m = 500$: 1 – при точно известных параметрах сигнала кроме фазового шума; 2 – алгоритм расширенного фильтра Калмана; 3 – алгоритм МНК; 4 – метод моментов (медиана)

Рисунок 5 иллюстрирует кривые помехоустойчивости приема сигнала 4-QAM на фоне шума с распределением Коши. Отношение сигнал/шум $q = 10 \lg \left(\frac{P_c}{N_0} \right)$ здесь весьма условная величина, т.к.

при ее расчете участвует выборочная дисперсия σ_K^2 белого шума Коши, рассчитанная по всей выборке длиной $m + n$: $N_0 = 2\sigma_K^2$, $P_c = \frac{\sum_{i=1}^{m+n} z_{ci}^2}{m+n}$. Замечание: значения q , соответствующие параметрам масштаба b , показаны ниже в таблице 2).

Из рисунков 4, 5 видно, что алгоритм оценивания амплитуды, фазы и сдвига частоты (4), (5), основанный на методе моментов при приеме сигнала 4-QAM позволяет получить вероятности ошибки близкие к значениям, которые достигаются при детектировании при точно известных параметрах сигнала. Напротив, расширенный фильтр Калмана (6), (7) и алгоритм МНК (9), (10), (11) дают близкие к друг другу значения вероятности ошибки и сильно проигрывают перед методом моментов. Так, при $b = 5 \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{ош}} = \frac{P_{(9)-(11)}}{P_{(4),(5)}} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{1.7 \cdot 10^{-3}} \cong 29$. Исключение составляет случай, когда $b = 10^{-4}$ ($q = 37$

дБ/бит) и нелинейная рекуррентная фильтрация дает схожий результат с алгоритмом (4), (5).

В таблице 2 показаны экспериментальные СКО оценивания амплитуды, фазы и сдвига частоты сигнала 4-QAM с известными тестовыми символами, полученные с помощью разных алгоритмов.

Таблица 2

Значения СКО оценивания неизвестных параметров сигнала 4-QAM, полученные по тестовой последовательности длиной $m = 500$ с помощью алгоритма расширенного фильтра Калмана, МНК и метода моментов (медиана)

$b/$ q дБ/бит	$10^{-4} / 37$	$5 \cdot 10^{-4} / 23$	$10^{-3} / 17$	$5 \cdot 10^{-3} / 3$	$10^{-2} / 3$	$5 \cdot 10^{-2} / 17$	$10^{-1} / 23$
Расширенный фильтр Калмана							
$СКО_A$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$7.7 \cdot 10^{-1}$	1.74
$СКО_\varphi$, град	1.21	1.44	1.46	14.9	11.5	28.2	36
$СКО_{\Delta f}$ Гц	9.61	22.7	38.2	$2.1 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^3$	$7.7 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^4$
МНК							
$СКО_A$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-1}$	$8.5 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	1.6	3.5
$СКО_\varphi$, град	0.14	0.62	1.2	5.2	11	17.4	24.4
$СКО_{\Delta f}$ Гц	7.95	38.5	72	361.1	990.5	$5 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^4$
Метод моментов (медиана)							
$СКО_A$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-1}$
$СКО_\varphi$, град	0.17	0.18	0.23	0.6	1.19	6.28	11.7
$СКО_{\Delta f}$ Гц	3.88	3.93	4.06	4.27	5.3	38.9	29.5

Результаты, показанные в таблице 2, позволяют сделать вывод о том, что метод моментов (4), (5) превосходит по точности оценивания неизвестных параметров сигнала расширенный фильтр Калмана (6), (7) и алгоритм МНК (9) - (11). Например, при параметре масштаба $b = 5 \cdot 10^{-4}$ СКО оценивания амплитуды у расширенного фильтра Калмана превышает в 5.5 раз, фазы – в 8 раз, а сдвига частоты в 5.8 раз соответствующие СКО у метода моментов. СКО оценивания при том же значении b , достигаемые с помощью МНК больше, чем у алгоритма (4), (5) в 2.6 раз по амплитуде, в 3.44 раза по фазе и в 9.8 раз по частоте.

Выводы. Алгоритм, основанный на методе моментов (медиана огибающей) позволяет получить более точную оценку неизвестных параметров сигнала, а значит и более высокую помехоустойчивость его приема по сравнению с процедурой МНК и расширенным фильтром Калмана.

Приложение. Вывод формулы (3).

Случайная величина μ_c распределена по Коши, т.е. ее ФПВ имеет вид:

$$w_{\mu}(x) = \frac{1}{\pi b \left(1 + \frac{x^2}{b^2}\right)} = \frac{b}{\pi} \cdot \frac{1}{(b^2 + x^2)}.$$

Рассмотрим величину $\beta_c = \mu_c^2$. Тогда, используя теорию функции от случайной величины, запишем ее ФПВ:

$$w(\beta_c) = \frac{1}{2\sqrt{\beta}} \left(w_{\mu}(\sqrt{\beta_c}) + w_{\mu}(-\sqrt{\beta_c}) \right) = \frac{1}{2\sqrt{\beta_c}} \left(\frac{b}{\pi} \cdot \frac{1}{(b^2 + \beta_c)} + \frac{b}{\pi} \cdot \frac{1}{(b^2 + \beta_c)} \right) = \frac{b}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\beta}(b^2 + \beta_c)}.$$

Случайная величина μ_s тоже распределена по Коши с нулевым параметром сдвига и параметром масштаба b , тогда величина $\beta_s = \mu_s^2$ имеют ФПВ: $w(\beta_s) = \frac{b}{\pi \sqrt{\beta_s}(b^2 + \beta_s)}$.

Рассмотрим величину $\gamma = \beta_c + \beta_s$. Ее ФПВ определяется сверткой ФПВ слагаемых:

$$w_{\gamma}(\gamma) = \int_0^{\gamma} w(\beta_c) w(\gamma - \beta_c) d\beta_c = \frac{b^2}{\pi^2} \int_0^{\gamma} \frac{d\beta_c}{\sqrt{\beta_c(\gamma - \beta_c)}(b^2 + \beta_c)(b^2 + \gamma - \beta_c)}.$$

Далее, преобразуем часть выражения в знаменателе:

$$(b^2 + \beta_c)(b^2 + \gamma - \beta_c) = b^2(b^2 + \gamma) + \beta_c(\gamma - \beta_c) = \chi^2 + \beta_c(\gamma - \beta_c),$$

где $\chi^2 = b^2(b^2 + \gamma)$. Тогда $w_{\gamma}(\gamma) = \frac{b^2}{\pi^2} \int_0^{\gamma} \frac{d\beta_c}{\sqrt{\beta_c(\gamma - \beta_c)}(\chi^2 + \beta_c(\gamma - \beta_c))}$.

Пусть $\beta_c = \gamma \sin^2(t) \Rightarrow$ если $\beta_c = 0$, то $t = 0$; если $\beta_c = \gamma$, то $t = \frac{\pi}{2}$;

$$d\beta_c = \gamma \sin(2t) dt; \quad \beta_c(\gamma - \beta_c) = \gamma^2 \sin^2(t) \cos^2(t) = \frac{\gamma^2}{4} \sin^2(2t).$$

Затем возьмем интеграл

$$\begin{aligned} \int_0^{\gamma} \frac{d\beta_c}{\sqrt{\beta_c(\gamma - \beta_c)}(\chi^2 + \beta_c(\gamma - \beta_c))} &= 8 \int_0^{\pi/2} \frac{dt}{4\chi^2 + \gamma^2 \sin^2(2t)} = 8 \int_0^{\pi/2} \frac{dt}{c^2 - \gamma^2 \cos^2(2t)} = \\ &= 4 \int_0^{\pi/2} \frac{d2t}{c^2 - \gamma^2 \cos^2(2t)} = 4 \int_0^{\pi} \frac{du}{c^2 - \gamma^2 \cos^2(u)}, \text{ где } c^2 = 4\chi^2 + \gamma^2, u = 2t. \end{aligned}$$

Подынтегральная функция $f(u) = \frac{1}{c^2 - \gamma^2 \cos^2(u)}$ – четная, неотрицательная, периодическая с

периодом π , симметричная относительно вертикальной оси, проходящей через точку $u_0 = \frac{\pi}{2}$:

$$f\left(\frac{\pi}{2} + u\right) = f\left(\frac{\pi}{2} - u\right), \text{ если } u \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]. \text{ Т.е.}$$

$$f\left(\frac{\pi}{2}+u\right)=\frac{1}{c^2-\gamma^2\cos^2\left(\frac{\pi}{2}+u\right)}=\frac{1}{c^2-\gamma^2\sin^2(u)}=f\left(\frac{\pi}{2}-u\right)=\frac{1}{c^2-\gamma^2\cos^2\left(\frac{\pi}{2}-u\right)}.$$

Тогда $4\int_0^{\pi}\frac{du}{c^2-\gamma^2\cos^2(u)}=\frac{8}{c^2}\int_0^{\pi/2}\frac{du}{1-\frac{\gamma^2}{c^2}\cos^2(u)}=|\text{по таблице}|=\frac{8}{c^2}\cdot\frac{\pi}{2\sqrt{1-\frac{\gamma^2}{c^2}}}=\frac{4\pi}{c\sqrt{c^2-\gamma^2}}=$

$$=\frac{4\pi}{2\chi\sqrt{4\chi^2+\gamma^2}}=\frac{2\pi}{b\sqrt{(b^2+\gamma)\sqrt{4b^2(b^2+\gamma)+\gamma^2}}}=\frac{2\pi}{b\sqrt{(b^2+\gamma)\sqrt{(2b^2+\gamma)^2}}}=\frac{2\pi}{b\sqrt{(b^2+\gamma)(2b^2+\gamma)}}.$$

После подстановки результата интегрирования в формулу для ФПВ величины γ получим:

$$w_{\gamma}(\gamma)=\frac{b^2}{\pi^2}\cdot\frac{2\pi}{b\sqrt{(b^2+\gamma)(2b^2+\gamma)}}=\frac{2b}{\pi\sqrt{(b^2+\gamma)(2b^2+\gamma)}}.$$

Огибающая представляет собой случайную величину $a=\sqrt{\gamma}$. Используя теорию функции от случайной величины, получим ФПВ огибающей:

$$w(a)=2a w_{\gamma}(a^2)=\frac{4ba}{\pi\sqrt{(b^2+a^2)(2b^2+a^2)}}.$$

Далее найдем медиану v случайной величины a : $\int_0^v w(a)da = \int_v^{\infty} w(a)da$,

$$\int_0^v \frac{4ba}{\pi\sqrt{(b^2+a^2)(2b^2+a^2)}} da = \int_v^{\infty} \frac{4ba}{\pi\sqrt{(b^2+a^2)(2b^2+a^2)}} da,$$

$$\int_0^{v^2} \frac{da^2}{\sqrt{(b^2+a^2)(2b^2+a^2)}} = \int_{v^2}^{\infty} \frac{da^2}{\sqrt{(b^2+a^2)(2b^2+a^2)}}.$$

Обозначим $t = \sqrt{b^2+a^2} \Rightarrow dt = \frac{da^2}{2\sqrt{b^2+a^2}} \Rightarrow da^2 = 2\sqrt{b^2+a^2} dt \Rightarrow$

$$2 \int_b^{\sqrt{v^2+b^2}} \frac{dt}{(b^2+t^2)} = 2 \int_{\sqrt{v^2+b^2}}^{\infty} \frac{dt}{(b^2+t^2)} \Rightarrow \frac{1}{b} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{b}\right) \Big|_b^{\sqrt{v^2+b^2}} = \frac{1}{b} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{b}\right) \Big|_{\sqrt{v^2+b^2}}^{\infty} \Rightarrow$$

$$\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{v^2+b^2}}{b}\right) - \operatorname{arctg}(1) = \operatorname{arctg}(\infty) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{v^2+b^2}}{b}\right) \Rightarrow$$

$$2\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{v^2+b^2}}{b}\right) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} = \frac{3\pi}{4} \Rightarrow \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{v^2+b^2}}{b}\right) = \frac{3\pi}{8} \Rightarrow$$

$$\frac{\sqrt{v^2+b^2}}{b} = \operatorname{tg}\left(\frac{3\pi}{8}\right) \Rightarrow v^2+b^2 = b^2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{3\pi}{8}\right) \Rightarrow$$

$$v = b \sqrt{\operatorname{tg}^2\left(\frac{3\pi}{8}\right) - 1} \cong 2.2b.$$

Литература

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Савватеев Ю.И. Оптимальный прием сигналов на фоне помех и шумов / под ред. Ю.И. Савватеева. М.: Радиотехника, 2011. 424 с.
3. Савватеев Ю.И. Помехозащищенность приема дискретных сигналов. / под ред. Ю.И. Савватеева, О.В. Назарова. М.: Радиотехника, 2015. 584 с.
4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2022. 840 с.
5. Маслов О.Н. Устойчивые распределения и их применение в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1994. 152 с.
6. Колядин В.Л. Распределения с бесконечной дисперсией и ограниченность классической статистики // Радиоэлектроника и информатика. 2002. № 2. С. 4 -11.
7. Oliyuk Olga, et al. Examining the Kalman Filter in the Field of Noise and Interference with the Non-Gaussian Distribution // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 4, no. 4, 2018, pp. 36-42, doi:10.15587/1729-4061.2018.140649.
8. Самаров Е.К. Обнаружение случайного сигнала на фоне негауссовской помехи при наличии обучающих неидеальных помеховых выборок // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4. №1. С. 75-79. doi: 10.52899/24141437_2025_01_75
9. Галкин В.М., Ерофеева Л.Н., Лецева С.В. Оценки параметра распределения Коши // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 2 (104). С. 314-319.
10. Смирнов П.О., Широков И.С., Шевляков Г.Л. Высокоэффективные робастные М-оценки параметра масштаба на базе Q-оценки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. № 10(3). С. 95-98.
11. Poborchaya N. E., Zharkikh S. A., Lobov E. M. The method of moments in the problem of estimating the parameters of a communication channel // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Vol. 18, No. 11, pp. 45-52. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-45-52. EDN VCOOUS.
12. Poborchaya N. E., Zharkikh S. A. Synthesis of an Algorithm of M-QAM Signal Estimation with Lognormal Noise // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). IEEE, 2024. С. 1-6.
13. Zharkikh S. A., Poborchaya N. E. Analysis of the Effect of the Lagrange Multipliers on the Estimation Algorithm Convergence of the Parameters M-QAM Signal Based on Method of Moments // 2025 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). IEEE, 2025. С. 1-6.
14. Поборчая Н. Е., Жарких С. А. Анализ влияния множителя Лагранжа на сходимость алгоритма оценивания параметров сигнала М-QAM, основанного на методе моментов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17, № 3. С. 15-21. DOI 10.36724/2409-5419-2025-17-3-15-21. EDN KJFJCI.
15. Поборчая Н.Е., Жарких С.А. Нелинейная рекуррентная фильтрация в задаче оценивания параметров сигнала М-QAM на фоне логнормальной помехи // Электросвязь. 2024. № 10. С. 7-12.
16. Жарких С.А., Поборчая Н.Е. Расширенный фильтр Калмана, метод моментов и помехоустойчивость приема сигнала М-QAM // Электросвязь. 2025. № 11. С. 77-84.
17. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2005. 840 с.
18. Жарких С.А., Поборчая Н.Е. Анализ точности оценивания параметров сигнала М-QAM на фоне атмосферных помех методом моментов, методом наименьших квадратов и нелинейной фильтрации // Электросвязь. 2025. № 12. С. 18-25.
19. Поборчая Н. Е., Кудряшова А. Ю. Анализ нерекуррентных алгоритмов детектирования сигнала 4-qam в системе с ММО с разным количеством антенн в условиях Релеевского канала с доплеровским расширением спектра // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16, № 5. С. 35-41. DOI 10.36724/2409-5419-2024-16-5-35-41. EDN JWYYLD.
20. Поборчая Н. Е., Жарких С. А. Синтез алгоритма оценивания параметров сигнала М-QAM на фоне логнормальной помехи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. Т. 15, № 5. С. 15-23. EDN CUTTXA.
21. Кудряшова А. Ю., Поборчая Н. Е. Применение научного потенциала студентов в модернизации лабораторного комплекса // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2024. Т. 13, № 4. С. 18-25. EDN GDGOM.
22. Поборчая Н. Е. Регуляризирующие алгоритмы детектирования сигнала М-QAM в системе с ММО, основанные на фильтрации Калмана // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 12. С. 4-10. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-12-4-10. EDN KYPSSX.
23. Поборчая Н. Е., Лобова Е. О. Анализ использования фильтра Калмана в процедуре детектирования сигнала в системе с ММО и приемником прямого преобразования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14, № 2. С. 4-9. DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-2-4-9. EDN JDZLZU.

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ В ГЕТЕРОГЕННЫХ КЛАСТЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОБАЛАНСИРУЮЩИХСЯ ДЕРЕВЬЕВ

Сулова Мария Андреевна

МТУСИ, бакалавр группы БСТ2201, Москва, Россия,
surovamma@mail.ru

Гадасин Денис Вадимович

МТУСИ, заместитель заведующего кафедры СИТус, к.т.н., доцент, Москва, Россия,
dengadiplom@mail.ru

Комкова Марина Георгиевна

МТУСИ, старший преподаватель кафедры СИТус, Москва, Россия,
m.g.komkova@mtuci.ru

Родина Алина Андреевна

МТУСИ, бакалавр группы БСТ2201, Москва, Россия,
alina_rodina2004@mail.ru

Аннотация

Стремительный рост доли гетерогенных структур в системах высокопроизводительных задач вызывает необходимость в интеллектуальных методах распределения вычислительной нагрузки. В статье предложена система динамической балансировки, основанная на красно-чёрном дереве, которая учитывает как текущую загрузку узлов, так и их аппаратные характеристики через единую метрику load для того, чтобы избежать неэффективного распределения, при котором мощные ускорители простаивают, а слабые CPU-серверы перегружены. Комбинация дерева для поиска по load и хэш-таблицы для быстрого доступа обеспечивает эффективное обновление состояния и выбор оптимального узла за $O(\log n)$. Эксперименты подтвердили корректность работы алгоритма и его пригодность для использования в динамических гетерогенных кластерах.

Ключевые слова:

Балансировка нагрузки, распределение вычислительных задач, красно-чёрное дерево, кластерная система, алгоритмы оптимизации, серверная инфраструктура.

Введение

Согласно прогнозам аналитиков ведущих мировых конференций, которые специализируются на высокопроизводительных вычислениях, кластерная организация архитектуры становятся самым часто используемым видом архитектуры [1-3]. Под гетерогенной понимается архитектура, которая сочетает в себе центральные процессоры, графические ускорители, FPGA и специализированные ИИ-чипы. Этот тренд логично возник на фоне быстрого роста задач, требующих сложных вычислений. К таким задачам относятся обучение крупных языковых моделей и моделирование в науке и промышленности ввиду того, что они требуют огромных затрат ресурсов. В таких условиях традиционные способы распределения задач становятся неэффективными, потому что учитывать разнообразие ресурсов и уровень их загрузки становится необходимо, а классические планировщики, которые ориентированы только на CPU-нагрузку, не способны адекватно работать с гетерогенными узлами.

Все важнее становится не просто отправить задачу на любой свободный узел, а выбрать именно тот, который лучше всего подходит для нее с учётом и того, насколько он сейчас загружен, и каким оборудованием оснащён. Чтобы принимать такие решения без потери эффективности, система должна постоянно отслеживать состояние всего кластера. Здесь на помощь приходят эффективные структуры данных, к которым относятся, например, красно-чёрные деревья. Они позволяют мгновенно находить подходящий узел и при этом сами поддерживают порядок даже при частых изменениях: независимо от того, как быстро и часто узлы освобождаются или перезагружаются, дерево быстро адаптируется без замедления работы. Благодаря этому удаётся строить действительно гибкие и от-

звичивые системы управления ресурсами, которые не делают отдельные узлы перегруженными, а распределяют работу разумно и справедливо. Эта проблема также поднимается в работах [4-7, 26-30].

В отличие от AVL-деревьев, обеспечивающих строгую сбалансированность, красно-черные деревья допускают небольшую асимметрию ввиду того, что этот алгоритм не ограничивает разницу высот напрямую, вместо этого он использует определенный набор цветовых правил для узлов. Благодаря этому свойству происходит снижение количества операций перебалансировки при частых операциях вставки и удаления. Учитывая, что в высокопроизводительных системах состояние кластера может меняться очень быстро: поступают новые задачи, узлы могут временно уменьшать частоту из-за перегрева или подключаться динамически, каждая лишняя операция увеличивает задержку принятия решений. Красно-черное дерево минимизирует эту задержку, при этом сохраняя гарантированную эффективность поиска, что играет особенно важную роль в системах реального времени.

Необходимо найти решение, которое позволит быстро и эффективно распределять нагрузку по узлам кластера с учетом их текущей загрузки таким образом, чтобы даже при частых изменениях система оставалась надежной. Задача заключается в разработке алгоритма динамической балансировки, который не только минимизирует время отклика при выборе исполнителя, но и предотвращает неэффективное распределение, при котором мощные ускорители простаивают, а слабые CPU-серверы оказываются перегружены. Разработанный алгоритм должен быть устойчив к частым изменениям топологии кластера, корректно обрабатывать как плановые, так и аварийные отключения узлов, а также обеспечивать минимальную вычислительную сложность при каждом запросе на распределение задачи. При этом важно, чтобы система не только реагировала на текущую загрузку, но и учитывала потенциальную производительность узла, например, наличие GPU или FPGA, которые могут выполнить задачу значительно быстрее, даже если их текущая загрузка немного выше, чем у CPU-сервера. Требуется не просто хранение списка узлов, а поддержание динамически обновляемой структуры данных, которая гарантирует как скорость поиска, так и корректность порядка с учётом всех факторов, влияющих на эффективность выполнения задачи.

Алгоритм модуля балансировки

Для решения задач распределения нагрузки была разработана и протестирована на контрольном примере система динамического распределения вычислительных задач в гетерогенном кластере, основанная на использовании красно-чёрного дерева, целью которой является обеспечение выбора наиболее подходящего узла для выполнения каждой задачи с учётом его аппаратного профиля и текущей загрузки. За «наиболее подходящий» будем принимать узел, у которого значение метрики load минимально. Увеличение нагрузки на сервер, выбранный таким образом, обеспечит ее равномерное распределение и предотвратит преждевременное исчерпание ресурсов отдельных серверов, обладающих наиболее высокой нагрузкой. На рисунке 1 представлен гетерогенный вычислительный кластер, нагрузку серверов которого распределяет централизованный балансировщик.

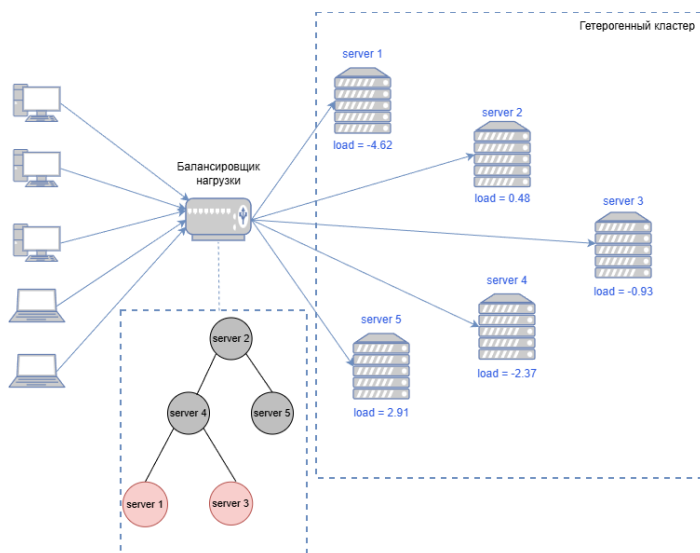


Рис. 1. Гетерогенный вычислительный кластер с балансировщиком

Система автоматически обновляет состояние узлов, поддерживает сбалансированную структуру данных и позволяет мгновенно находить ресурс с минимальной нормализованной занятостью, что является необходимым для повышения эффективности использования разнородных вычислительных мощностей и предотвращения ситуаций, когда мощные ускорители простаивают, а слабые узлы перегружены. Эта проблема является особенно актуальной в условиях работы с искусственным интеллектом ввиду того, что задачи могут отличаться по требованиям к памяти, пропускной способности и типам вычислений, например, могут быть использованы матричные и скалярные вычисления.

Аналогичные методы были использованы в работах [8-11]. Для того, чтобы избежать ситуации, когда задача, требующая параллельной обработки, назначается на слабый CPU-сервер только потому, что его загрузка ниже, чем у простаивающего GPU, в этой системе каждый узел кластера характеризуется скалярной метрикой load, которая отражает комплексную оценку загрузки CPU, включающую тип ускорителя, текущую очередь задач, энергопотребление и пропускную способность памяти. Даже если GPU-сервер будет иметь ненулевую загрузку, значение его метрики load может быть ниже, чем у полностью свободного CPU-сервера, благодаря наличию специализированного ускорителя. Широкое распространение приобретают задачи, чувствительные к типу оборудования, например, обработка видео в реальном времени, именно поэтому сейчас особенно важно, чтобы система могла не просто реагировать на гевычислительную мощность узла.

Все узлы хранятся в красно-чёрном дереве, отсортированном по возрастанию значения load. Для быстрого доступа по идентификатору дополнительно используется хэш-таблица server_map. Эта комбинация упрощает обновление состояния: при поступлении новых данных узел сначала находится в хэш-таблице, затем удаляется из дерева и вставляется заново с обновлённым ключом. Функция register_server (рис. 2) добавляет новый узел в обе структуры одновременно. После вызова узел сразу становится доступен для распределения задач, что способствует динамическому расширению кластера без перезапуска системы. В устаревших системах для корректного управления кластерами необходимы остановка их работы, обновление конфигурационного файла и перезапуск балансировщика или сервиса. Разработанная система работает непрерывно: серверы способны подключаться во время выполнения задач и сразу же начинать получать нагрузку. В облачных средах, где масштабирование часто происходит автоматически, это особенно ценно: если произойдет запуск нового контейнера с GPU, он будет немедленно включён в пул доступных ресурсов без задержек, связанных с конфигурацией или инициализацией.

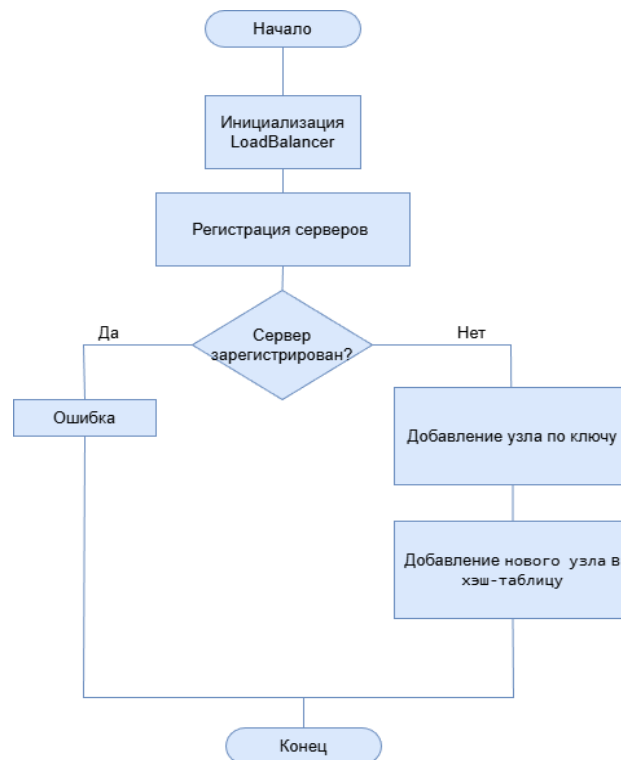


Рис. 2. Функция register_server

Вставка в дерево выполняется через метод `insert_node` (рис. 3), после добавления запускается функция `_fix_insert` (рис. 4), которая восстанавливает свойства красно-чёрного дерева с помощью поворотов и перекраски. Без этого шага глубина дерева могла бы вырасти до $O(n)$, то есть, дерево могло бы выродиться в длинную цепочку, что заставило бы поиск занимать дольше времени. Для того, чтобы этого не произошло, метод `insert_node` сначала ставит новый узел туда, куда он логически подходит, как в обычном бинарном дереве поиска, а потом сразу вызывает специальную процедуру `_fix_insert`, созданную для восстановления баланса дерева. Эта процедура отвечает за перекрашивание узлов и при необходимости перестраивает связи так, чтобы дерево оставалось сбалансированным: все пути от корня до листьев содержали одинаковое количество чёрных узлов, а красные никогда не стояли друг за другом. Благодаря этому, даже если в систему одновременно зарегистрируется сотня новых серверов, она продолжит работать быстро и предсказуемо, предотвращая внезапные задержки, вызванные несбалансированной структурой данных.

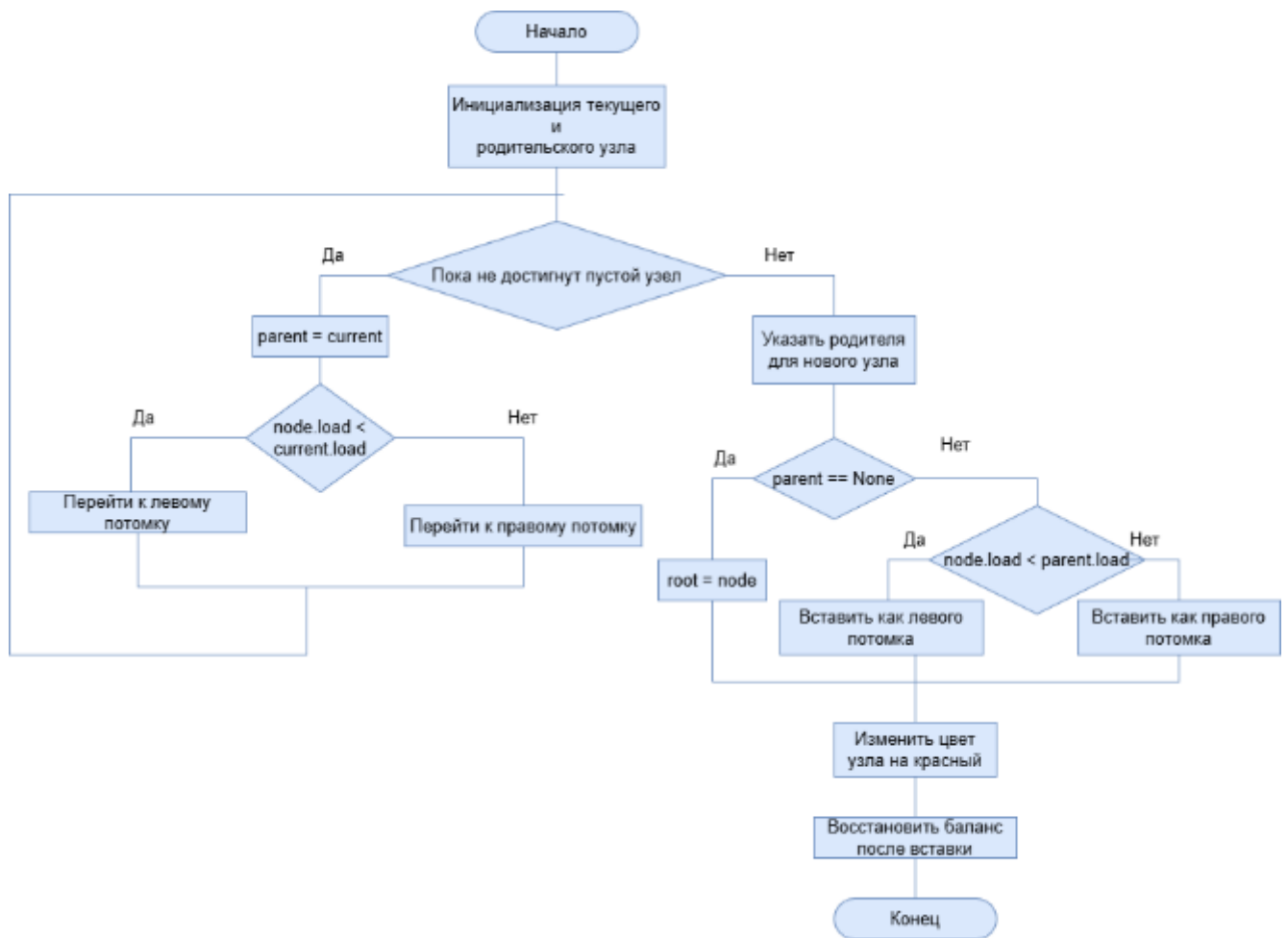


Рис. 3. Функция `insert_node`

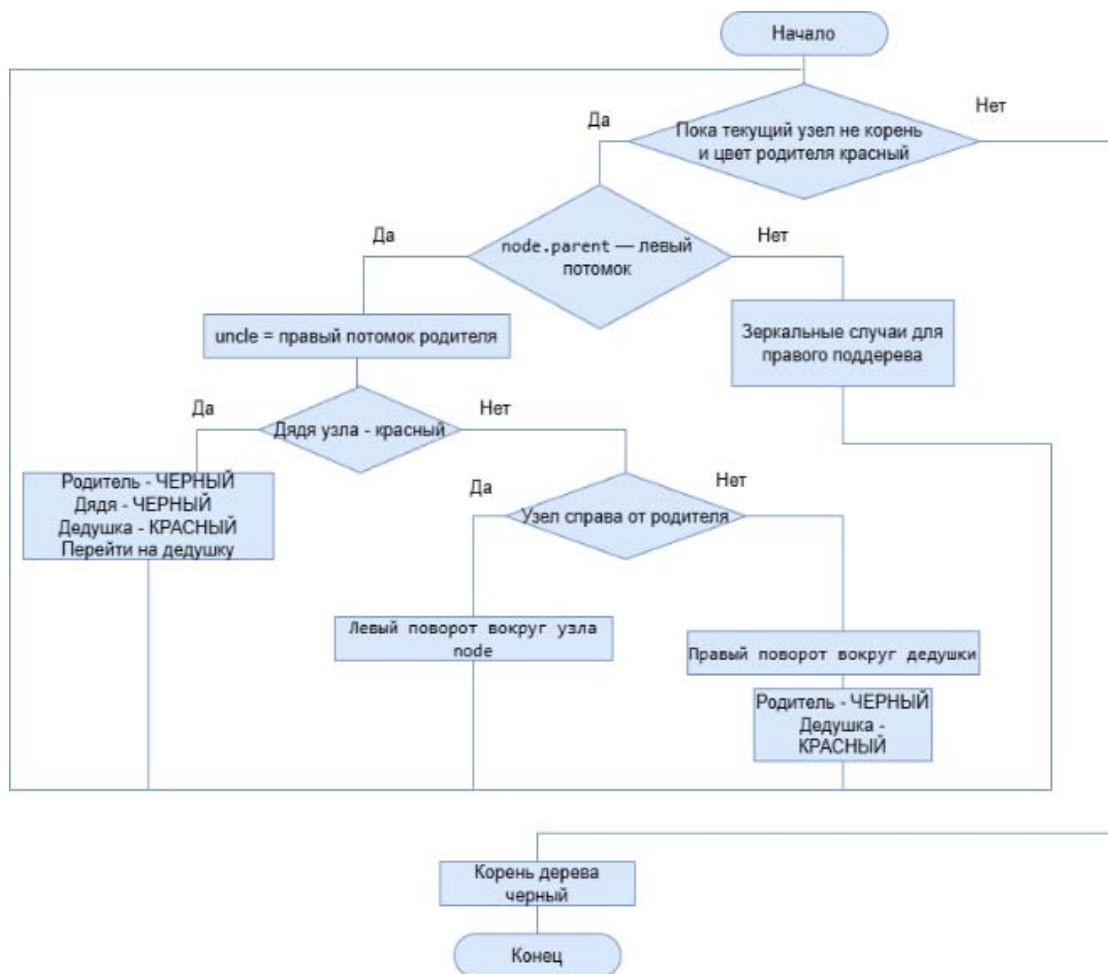


Рис. 4. Функция fix_insert

При отключении узла (плановом или аварийном) вызывается функция delete_node (рис. 5). Она использует вспомогательный метод _transplant для корректной замены одного поддерева другим, после чего активируется _fix_delete - алгоритм, устраняющий нарушения баланса, возникающие при удалении чёрного узла (рис. 6).

Такое нарушение приводит к появлению так называемого «двойного чёрного» узла, что нарушает инвариант равенства числа чёрных узлов на всех путях от корня к листьям. Процедура _fix_delete последовательно анализирует конфигурацию «брата» и его потомков, применяя повороты и перекраску до полного восстановления свойств дерева. Так, в случае аварийного отключения узла может быть удалён, если от него не поступает сигнала о его работе, что также вызывает процедуру delete_node, таким образом обеспечивая проверку актуальности состояния кластера.

Удаление узла является одной из самых сложных и важных операций в красно-чёрном дереве, поскольку благодаря этой операции может произойти нарушение баланса всей системы в целом, однако благодаря тщательно проработанному алгоритму _fix_delete, система сохраняет стабильность даже при массовом выходе узлов, например, при аварийном отключении целой стойки в дата-центре.

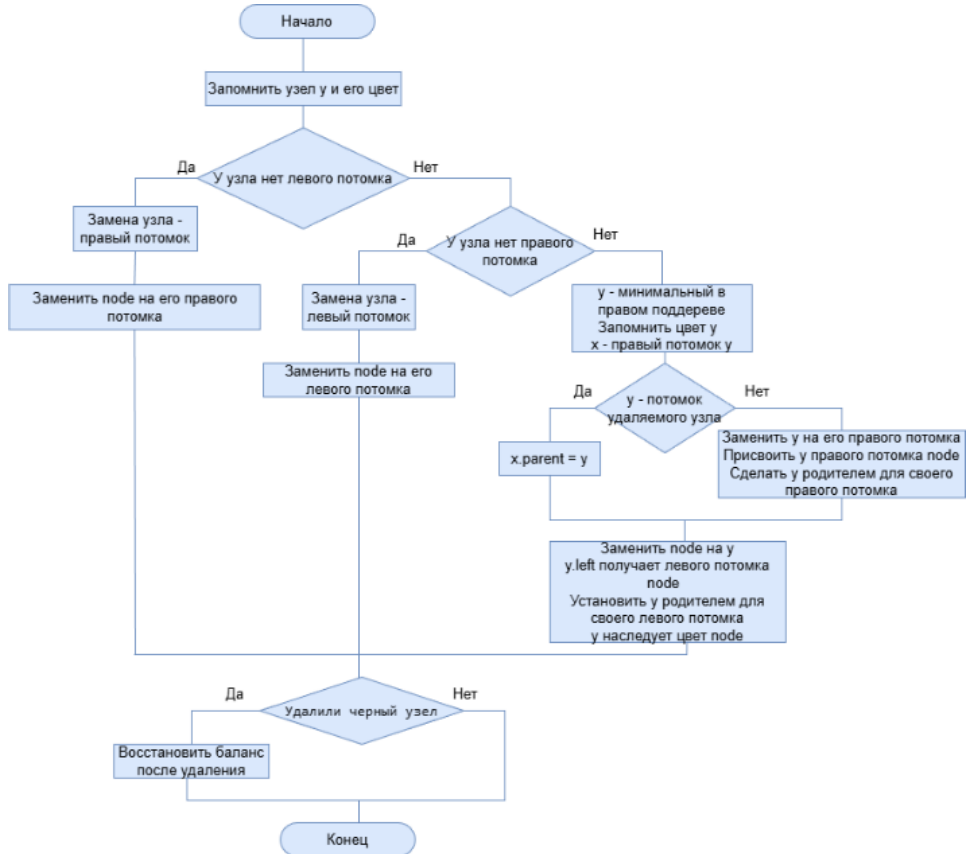


Рис. 5. Функция delete_node

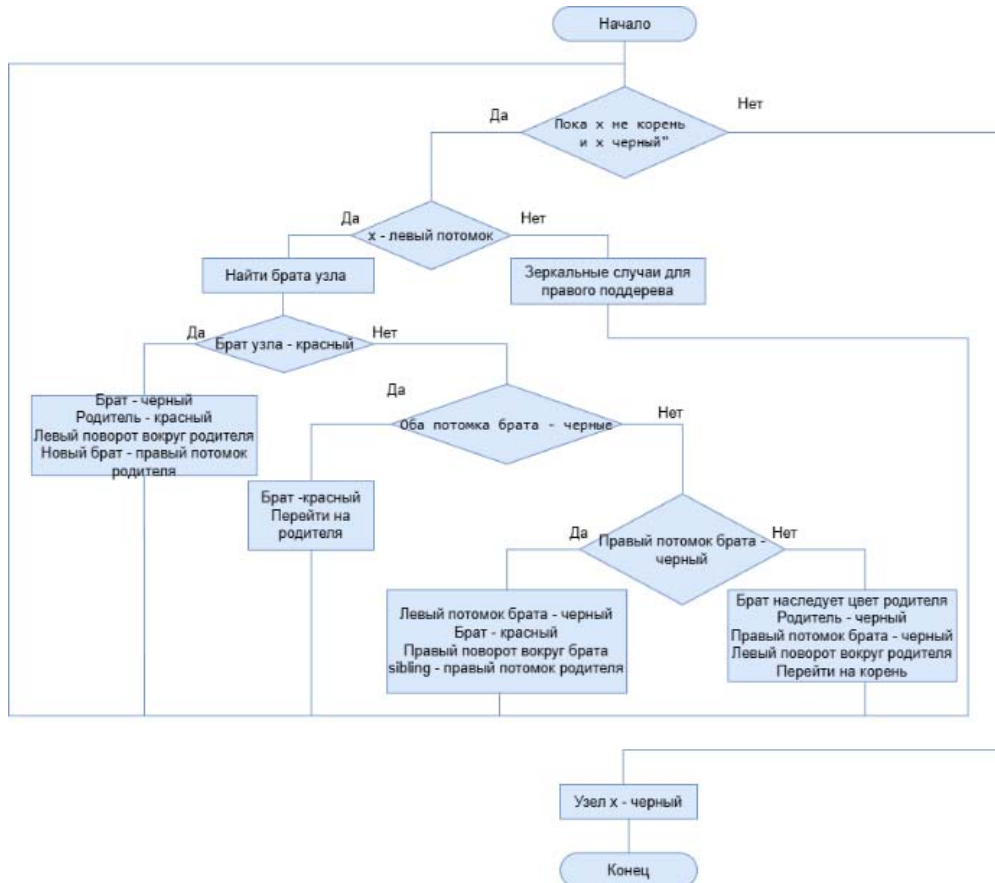


Рис. 6. Функция fix_delete

Основная логика распределения задач реализована в функции `distribute_request` (рис. 7). Для обеспечения корректного позиционирования узла и исключения ошибок, связанных с прямым изменением ключа в уже построенном дереве, функция реализована с помощью двух операций балансировки. Необходимость такой функции объясняется в работах [12-14]. Она находит узел с минимальным значением `load` путём обхода самого левого пути дерева, операция завершается за $O(\log n)$.

После назначения задачи значение `load` узла пересчитывается с учётом новой нагрузки, и узел удаляется из дерева, а затем вставляется заново. Цикл операций удаления, обновления состояния узла и вставки его в систему обеспечивает нахождение узла в правильной позиции, которая соответствует его актуальной нагрузке, даже если в ее значении произошли значительные изменения. Например, если на GPU, который ранее простаивал, была запущена тяжелая задача. Этот подход позволяет задаче не застаиваться на узле, который не будет на данный момент самым эффективным, так как даже в том случае, если нагрузка уже после назначения сильно возрастает, следующая задача будет направлена на другой ресурс, обладающий меньшей нагрузкой.

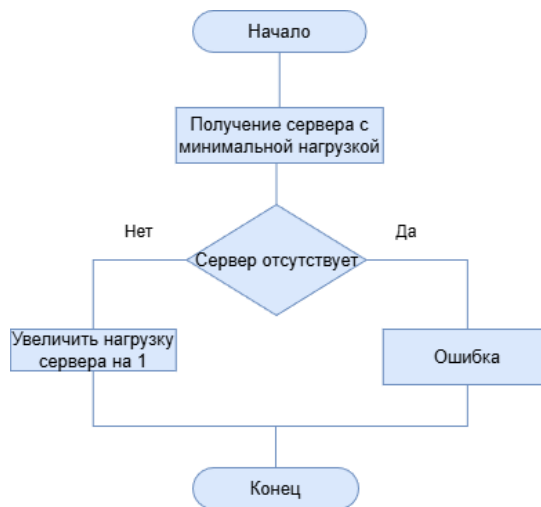


Рис. 7. Функция `distribute_request`

Механизмы `_fix_insert` и `_fix_delete` реализуют полный набор правил, определяющих корректность красно-чёрного дерева. На рисунках 8.1-8.2 проиллюстрирован типичный случай вставки: узел с ключом 1 и его родитель (5) оказываются красными, что нарушает правило «красный родитель не может иметь красного потомка». Поскольку «дядя» (узел 20) чёрный, алгоритм выполняет правый поворот вокруг деда (10) и корректирует цвета, восстанавливая баланс. Аналогично, при удалении чёрного узла (рис. 8.3-8.5) возникает «двойная чёрнота», которую устраняют через анализ цвета «брата» и последовательные повороты, пока инвариант дерева не будет полностью восстановлен.

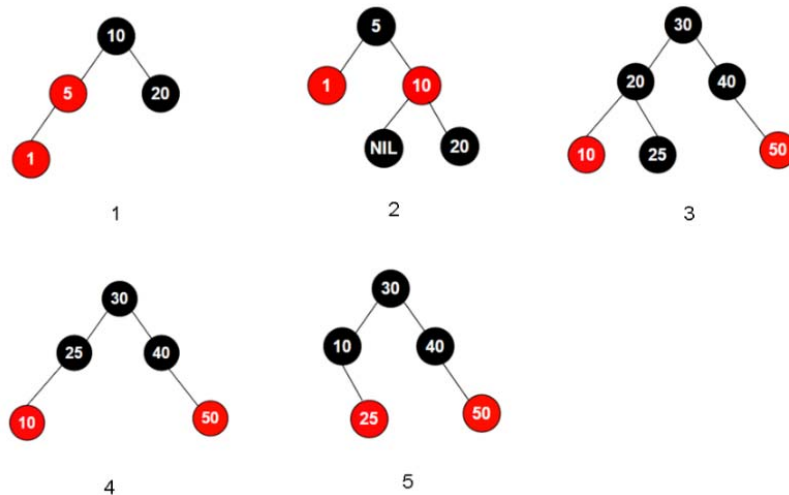


Рис. 8. Балансировка нагрузки с помощью красно-черного дерева

Все это необходимо для отслеживания внутреннего состояния структуры данных, таким образом давая возможность убедиться, что правила построения алгоритма красно-черного дерева не были нарушены ни на одном из этапов добавления узлов.

Тестирование и анализ работы разработанного модуля.

Для верификации корректности работы системы был использован файл `example.csv`, содержащий пять значений `load`: 0.48, -2.37, 2.91, -4.62, -0.93. Отрицательные значения моделируют узлы с избыточной вычислительной ёмкостью, например, простаивающие GPU с низким энергопотреблением. При построении дерева были использованы все цветовые правила и, таким образом, верно построенное дерево показало, что узел с `load = -4.62` действительно становится самым левым листом, то есть приоритетным кандидатом для назначения новой задачи. Важно заметить, что построенная система правильно интерпретирует отрицательные значения нагрузки как признак высокой доступности узла. Подобные методы тестирования были также подробно рассмотрены и использованы в работах [15-17]. Результат построения дерева вручную представлен на рисунке 9.

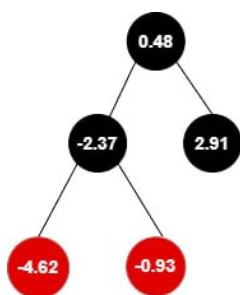


Рис. 9. Построенное вручную дерево

Результат работы программного модуля

Автоматическая проверка проводилась с помощью класса `CSVBalancer`, специально разработанного для интеграции внешних данных в систему распределения задач. При инициализации модуль принимает путь к CSV-файлу, открывает его в режиме чтения и последовательно обрабатывает каждую строку как описание отдельного вычислительного узла. Для каждой записи формируется уникальный идентификатор (например, на основе порядкового номера строки), извлекается числовое значение метрики `load`, и вызывается функция `register_server`, которая регистрирует узел как в красно-чёрном дереве, так и в хэш-таблице `server_map`.

После завершения загрузки всех записей модуль выполняет симметричный обход дерева и формирует текстовое представление его структуры: для каждого узла выводится значение `load` и его цвет («красный» или «черный»), что позволяет наглядно оценить корректность балансировки. В случае ошибок, например, если файл не найден, нарушен формат данных или строку не удаётся превратить в число, система не завершает свою работу, а получает исключение и выводит понятное сообщение об ошибке, что предотвращает аварийное завершение и делает взаимодействие с внешними системами мониторинга гораздо надёжнее и проще.

Такой подход необходим для повышения уровня отказоустойчивости модуля и упрощения поиска проблем, связанных с интеграцией дополнительных модулей при расширении функционала. Особенно полезной оказалась возможность логировать каждую операцию: регистрацию, обновление или удаление узла. При дальнейшей работе это значительно облегчает аудит и анализ поведения системы в реальных условиях, а при диагностике неочевидных сбоев такой уровень прозрачности может оказаться решающим. В ходе тестирования использовался файл `example.csv` с пятью значениями нагрузки: -4.62, 0.48, -2.37, 2.91 и -0.93.

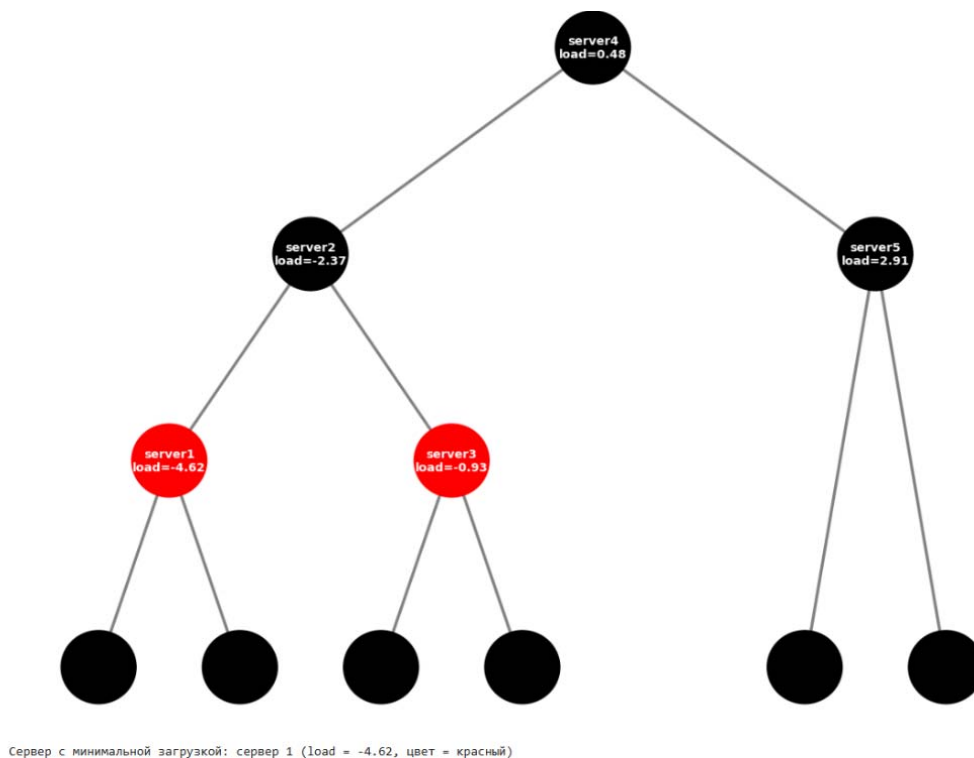


Рис. 10. Результат работы программы

Программа корректно обработала все записи, построила сбалансированное красно-чёрное дерево и правильно определила, что узел с нагрузкой -4.62 имеет минимальное значение. Результат был выведен в консоль в виде дерева, полностью совпадающего с тем, что получается при ручном построении. В построенном дереве указаны правильные цвета и нагрузки узлов, узел с наименьшим значением действительно находится в самой левой позиции, а правила чередования цветов нигде не нарушены, возможно провести подсчет стоимости дерева [18-20]. Всё это подтверждает, что система не допускает ошибок и при работе с реальными данными. Результат работы представлен на рисунке 10.

Заключение

Применение красно-чёрного дерева в условиях гетерогенного вычислительного кластера позволяет перейти от простого равномерного распределения задач к осознанному выбору наиболее подходящего исполнителя. В отличие от классических балансировщиков, ориентированных на однородные серверы [21], предложенная система объединяет разнородные характеристики узлов – тип ускорителя, текущую загрузку, энергопотребление и пропускную способность памяти. Итак, задача разработки системы, где распределение задач будет происходить не только равномерно, но и эффективно, была решена и может быть использована при решении задачи компьютерного зрения [22, 23].

Разработанная система демонстрирует, что даже в условиях крайней гетерогенности аппаратных ресурсов возможно построить единый, согласованный механизм управления, который работает быстро, надёжно и адаптивно. Важную роль этот подход играет в динамических средах, где состав кластера постоянно меняется: узлы могут подключаться по мере роста нагрузки, отключаться для обслуживания или выходить из строя, а их производительность может снижаться из-за теплового троттлинга. Алгоритм построения красно-чёрного дерева обеспечивает стабильную производительность системы даже в условиях интенсивных изменений благодаря тому, что время операций гарантированно остаётся в пределах $O(\log n)$, а баланс структуры автоматически восстанавливается после каждой вставки или удаления.

На основании результатов эксперимента можно сделать вывод о том, что система в равной степени точно находит узел, подходящий по правилам: будь то при ручном моделировании или при обработке реальных данных, выгруженных из конкретного источника, что должно быть протестировано

[24, 25]. Это демонстрирует, что использование красно-чёрного дерева не просто красивая теория, а рабочее решение, которое напрямую отвечает вызовам современных вычислительных инфраструктур.

Литература

1. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Yudin A. A.* Clustering methods in large-scale systems // *Synchroinfo Journal*. 2020. Vol. 6, No. 5, pp. 21-24. DOI 10.36724/2664-066x-2020-6-5-21-24. EDN XHNSYV.
2. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Koltsova A. V.* Cluster model for edge computing // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 : Proceedings, Vienna, 20-22 октября 2020 года. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9261538. DOI 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261538. EDN FGDLSA.
3. *Gadasin D. V., Koltsova A. V., Gadasin D. D.* Algorithm for Building a Cluster for Implementing the 'Memory as a Service' Service in the IoT Concept // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings, Moscow, 16-18 марта 2021 г. Moscow, 2021. P. 9416112. DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416112. EDN VRPCFG.
4. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Klygina O. G.* Organization of Interaction Between the Concept of Fog Computing and Segment Routing for the Provision of IoT Services in Smart Grid Networks // *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2022. Vol. 5, No. 1, pp. 141-146. EDN UQSHRH.
5. *Shvedov A. V., Gadasin D. V., Pak E. V.* Application of the Backman Model for the Distribution of Traffic Flows in Networks with Segment Routing // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15-17 марта 2022 г. Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744344. EDN RBMTBQ.
6. *Иванова Л.Н., Иванов С.Е.* Методы оптимизации и алгоритм маршрутизации в транспортной логистике // ЭПИ. 2024. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-optimizatsii-i-algoritm-marshrutizatsii-v-transportnoy-logistike> (дата обращения: 21.12.2025).
7. *Гадасин Д. В., Смальков Н. А., Кузин И. А.* Использование метода роя частиц для балансировки нагрузки в сетях Интернета вещей // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2022. Т. 13, № 2. С. 17-23. EDN LIUWNT.
8. *Немеров А. А., Крупский А. С., Кулбаев С. С.* Балансировка нагрузки в мультиагентных системах // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2014. №14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/balansirovka-nagruzki-v-multiagentnyh-sistemah> (дата обращения: 23.12.2025).
9. *Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Применение транспортной задачи для балансировки нагрузки в условиях нечеткости исходных данных // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Т. 18, № 1. С. 13-20. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-1-13-20. EDN WKNPIX.
10. *Кольчугина Е. А.* Искусственные миры: распределение данных // *Программные продукты и системы*. 2013. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennye-miry-raspredelenie-dannyh> (дата обращения: 24.12.2025).
11. *Гадасин Д. В., Вакурин И. С., Трemasова Л. А.* Алгоритм распределения данных между системами хранения на основе свойства самоподобия // *Электросвязь*. 2024. № 4. С. 44-50. DOI 10.34832/ELSV.2024.53.4.007. EDN BRSLCL.
12. *Золотарева П. Ю., Гадасин Д. В., Маклачков К. А.* Методы обработки информации в распределенных информационных системах // *Тенденции развития Интернет и цифровой экономики : Труды VI Международной научно-практической конференции, Симферополь-Алушта, 01-03 июня 2023 г. Симферополь: ИП Зуева, 2023. С. 187-189. EDN LGONZK.*
13. *Барковский Е. А., Кучумов Р. И., Соколов А. В.* Оптимальное управление двумя work-stealing деками в общей памяти при различных стратегиях перехвата работы // *Программные системы: теория и приложения*. 2017. №1 (28). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-dvumya-work-stealing-dekami-v-obschey-pamyati-pri-razlichnyh-strategiyah-perehvata-raboty> (дата обращения: 24.12.2025).
14. *Гадасин Д. В., Pak E. V., Коровушкина В. М., Мелькова Е. К.* Предобработка текстовой информации на основе термов естественного языка // *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы*. 2022. Т. 12, № 1. С. 4-11. EDN PDGAVP.
15. *Бахвалов Л. А., Цацорин Е. А.* Управление потоками данных в кластерных информационных системах // *ГИАБ*. 2014. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-potokami-dannyh-v-klasternyh-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 27.12.2025).
16. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Мелькова Е. К.* Структурирование данных исходя из центра масс // *Актуальные проблемы и перспективы развития экономики : Труды XXI Международной научно-практической конференции, Симферополь-Гурзуф, 20-22 октября 2022 г. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2022. С. 266-268. EDN RFCCST.*
17. *Привалов А. Н., Клепиков А. К.* Разработка балансировщика нагрузки в гибридных сетях // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2014. №9-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-balansirovschika-nagruzki-v-gibridnyh-setyah> (дата обращения: 27.12.2025).

18. *Гадасин Д. В.* Построение бинарного дерева минимальной цены // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 11. С. 38-44. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-38-44. EDN GMCEWG.
19. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Алексеева Е. А.* Информационная энтропия в стохастических сетях связи // Телекоммуникационные и вычислительные системы 2020 : Труды международной научно-технической конференции, Москва, 14-17 декабря 2020 г. Московский технический университет связи и информатики. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. С. 108-116. EDN IOGLQH.
20. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Vakurin I. S.* Determination of Semantic Proximity of Natural Language Terms for Subsequent Neural Network Training // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15-17 марта 2022 г. Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744290. EDN LASMDY.
21. *Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Проблемы интеграции концепции "Интернет вещей" и облачных вычислений // Технологии информационного общества : Материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 20–21 марта 2019 года. Том 2. М.: Издательский дом Медиа Паблшер, 2019. С. 22-23. EDN MEQRFA.
22. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Kuzin I. A.* Reconstruction of a Three-Dimensional Scene from its Projections in Computer Vision Systems // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 – Conference Proceedings, Moscow, 11-12 ноября 2021 г. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639161. EDN CKSNPA.
23. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Kuzin I. A.* A model for representing the color and depth metric characteristics of objects in an image // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 – Conference Proceedings, Svetlogorsk, Kaliningrad Region, 30 июня – 02 июля 2021 г. Svetlogorsk, Kaliningrad Region, 2021. P. 9488349. DOI 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488349. EDN YAYZVP.
24. *Zolotukhin P. A., Melkova E. K., Gadasin D. V., Korovushkina V. M.* Using Intelligent Testing as a Tool to Improve the Quality of Transport Information Systems // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15-17 марта 2022 г. Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744348. EDN NOMJLX.
25. *Шведов А. В., Гадасин Д. В., Коровушкина В. М., Мелькова Е. К.* Интеллектуальное тестирование как способ повышения качества информационной системы // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2022. Т. 12, № 2. С. 43-52. EDN GOLZGE.
26. *Гадасин Д. В.* Способ определения основных узлов сети для анализа ее состояния // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 12. С. 16-24. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-12-16-24. EDN FGAATI.
27. *Гадасин Д. В., Кобелькова А. Д., Родина А. А., Сурова М. А.* Погрешности выполнения математических операций над приближенными числами // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2025. Т. 14, № 2. С. 59-65. EDN RUOSZM.
28. *Герцев К. Н., Литвинова А. М., Трemasова Л. А., Гадасин Д. В.* Особенности применения алгоритма гибридной сортировки // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2025. Т. 15, № 4. С. 32-40. EDN FUAOYW.
29. *Shvedov A. V., Gadasin D. V., Alyoshintsev A. V.* Segment routing in data transmission networks // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Vol. 16, No. 5, pp. 56-62. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-5-56-62. EDN VAYLJQ.
30. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Кузин И. А.* Трехмерная реконструкция объекта по одному изображению с использованием глубоких сверточных нейронных сетей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 7. С. 29-35. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-7-29-35. EDN YTLCNW.