На правах рукописи



Сальников Роман Олегович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа, 2026

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» **Султанов Альберт Ханович**

Официальные оппоненты:

Козлов Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»

Семенов Евгений Сергеевич, доктор технических наук, доцент по кафедре телекоммуникационных систем, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита диссертации состоится 28 декабря 2026 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте https://uust.ru/

Автореферат разослан «____» _____2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук А.М. Вульфин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Переход к архитектурам шестого поколения и экспансия сервисов пятого поколения, таких как ультранадёжная связь с низкими задержками (Ultra-Reliable Low Latency Communication, uRLLC), массивная связь машинного типа (massive Machine Type Communication, mMTC) и расширенная мобильная широкополосная связь (Enhanced mobile broadband, eMBB) в сетях 5G, а также потенциальный качественный скачок в 6G сигнализируют о фундаментальном расширении зоны покрытия и количестве сценариев использования беспроводных сетей передачи данных.

Технологии 5G, несмотря на свою продвинутость, остаются ограниченными экономической целесообразностью развертывания наземной инфраструктуры. 6G, в свою очередь, изначально проектируется как единая конвергентная наземно-спутниковая экосистема. Гибридизация наземных систем связи за счет интеграции с массовыми низкоорбитальными группировками (Non-Terrestrial Networks, NTN) перестает быть опцией и становится основой, необходимой для обеспечения глобального, бесшовного покрытия, поддержки приложений (удаленная хирургия, автономный транспорт) и подключения десятков миллиардов устройств Интернета вещей (Internet of Things, IoT).

Базовыми технологиями для нисходящего и восходящего каналов в 4G и 5G остаются ортогональное частотное мультиплексирование (Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) и его модификация с использованием дискретного преобразования Фурье (Discrete Fourier Transform-Spread-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, DFT-s-OFDM). В перспективе сетей шестого поколения они все еще будут актуальны из-за технологической преемственности сетей связи.

Из-за высокой спектральной эффективности OFDM рассматривается в качестве основной технологии для систем совмещенной связи и зондирования (Integrated Sensing and Communication, ISAC). DFT-s-OFDM остается актуальной за счет низкого пик-фактора, необходимого для энергоэффективной передачи, а также огромного потенциала к модификации (DFT-s-OFDM с линейной частотной модуляцией, chirped DFT-s-OFDM).

Affine Frequency Division Multiplexing (AFDM) и Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), альтернативные классическим методам модуляции, решают узкоспециализированные задачи. AFDM эффективна в сценариях с высокой мобильностью абонентов, а OTFS обеспечивает повышенную устойчивость к доплеровскому сдвигу за счет работы в сетке «задержка-Доплер», но полноценное внедрение этих технологий нецелесообразно из-за высокого пик-фактора, требований к объему служебной информации, а также повышенной вычислительной сложности реализации в условиях актуальной инфраструктуры, заточенной под OFDM и ее модификации. У потенциальной интеграции спутникового и наземного сегментов есть несколько фундаментальных технических проблем.

1. Точность синхронизации в условиях экстремального доплеровского сдвига. Движение негеостационарных спутников вызывает доплеровские сдвиги до 720 кГц. Для известных методов оценки частотного рассогласования, основанных на корреляционном анализе опорных структур сигнала, подобные величины сдвигов зачастую чрезмерны, к тому же они теряют устойчивость при низком отношении сигнал/шум, что затрудняет восстановление сигнала.

2. Низкая энергоэффективность передачи. Высокий уровень пик-фактора приводит проблемам в работе маломощных бортовых усилителей спутников, вызывая дополнительные искажения и снижая общую энергоэффективность системы.

3. Компромисс между помехоустойчивостью и пропускной способностью. Традиционные методы внедрения служебной информации в опорные структуры сигнала (пилот-сигналы, защитные интервалы) либо жертвуют пропускной способностью для обеспечения помехоустойчивости и синхронизации, либо снижают надежность связи в условиях сильных искажений и интерференции.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка методов, направленных на обеспечение высокой точности синхронизации, энергоэффективности передачи и помехоустойчивости при приемлемой вычислительной сложности для надежной работы гибридных систем связи.

Степень разработанности темы. Теоретический базис построения гибридных архитектур и интеграции космического сегмента рассмотрен в работах Парфенова В.И., Прозорова Д.Е., Абилова А.В., Бегишева В.О., Сопина Э.С., Самуйлова К.Е., Васильева Д.С., Колбанева М.О., Татарниковой Т.М., Козлова С.В., Тимофеева А.Л., Спириной Е.А., Карташевского В.Г., Карташевского И.В., С. В. Бородича, В. П. Минашина, А. В. Соколова, Н.И. Калашникова, Л.Я. Кантора, В.М. Дорофеева, Котельникова В.А., а также ученых коллективов «Бюро 1440», «ИСС им. М.Ф. Решетнёва», и др.

Вопросы интеграции наземных и спутниковых сегментов связи рассматривались в работах Назарова Л.Е., Бетанова В.В., Пашинцева В.П., Калмыкова И.А., Цветкова К.Ю., Анисимова В.Г., Мальцева Г.Н., Новикова Е.А., Федоровой Л.В., Куницина В.Е., Нестерова И.А., Гаврика А.Л, Смирнова В.М., Ступина Д.Д., Darwish T., Kurt G.K., Yanikomeroglu H., Bellemare M., Lamontagne G., Höyhtyä M., Bumar S., Yastrebova A., Järvensivu P., Kiviranta M., Anttonen A., а также в исследованиях рабочих групп 3GPP.

В области ортогонального частотного мультиплексирования и его модификаций, а также в области методов оценки частотного рассогласования, снижения пик-фактора (PAPR) и оптимизации структур пилот-сигналов для OFDM-систем значительный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые: Логинов С.С., Карташевский В.Г., Мешкова А.Г., Ишмияров А.А., Мешков И.К., Султанов А.Х., Зуев М.Ю., Назаров Л.Е., Таубин Ф.А.,

Шинаков Ю.С., Дворкович В.А., Минаев И.Г., Макаров С.Б., Коржихин О.Е., Власюк И.В., Майстренко В.А, Рашич А.В., Р. Пратт, Дж. Чемберс, С. Уинн, С. Вайнштейн, П. Эберт и другие ученые Bell Labs, а также современные исследователи F. Classen, P. Moose, Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G., G. Berardinelli, R. Nissel, A. Şahin, R. Yang, R. L. Olesen, F. Frederiksen, K. Pedersen, P. Mogensen и др.

Тем не менее, существующие методы не в полной мере учитывают специфику гибридных систем связи, использующих спутники на геостационарной и негеостационарной орбитах. В частности, традиционные алгоритмы оценки частотного рассогласования обладают ограниченным диапазоном и точностью в условиях интенсивного доплеровского сдвига и низкого отношения сигнал/шум.

Широко применяемые методы снижения пик-фактора либо обеспечивают недостаточное подавление PAPR, либо приводят к неприемлемому росту вычислительной сложности или ухудшению помехоустойчивости. Кроме того, классические подходы к построению защитных интервалов и распределению пилот-сигналов создают значительную служебную нагрузку, снижая и без того ограниченную спектральную эффективность спутникового канала.

Перспективным направлением развития является создание интегрированных методов обработки сигналов, совместно решающих указанные проблемы. Это включает разработку алгоритмов оценки рассогласования, использующих расширенные опорные структуры для увеличения диапазона и точности оценок; методов формирования сигналов на основе адаптивного предкодирования для снижения PAPR; а также применения принципов голографического кодирования в формировании защитных интервалов и служебных последовательностей, обеспечивающих точную синхронизацию потенциальном снижении объема самой служебной информации.

Исходя из предоставленной выше информации, можно сделать вывод о научной и практической актуальности задачи разработки высокоэффективных методов синхронизации и формирования сигналов в системах, ориентированных на специфику гибридных сетей связи.

Объект исследования. Спутниковый и наземный сегменты гибридных сетей связи.

Предмет исследования. Алгоритмы оценки и компенсации частотного рассогласования, снижения пик-фактора и преобразования служебной информации в гибридных системах связи на базе OFDM и DFT-s-OFDM, отвечающих требованиям сетей радиодоступа пятого и шестого поколений.

Цель работы. Повышение точности синхронизации, энергоэффективности и помехоустойчивости в спутниковом и наземном сегментах будущих гибридных сетей связи на основе принципов

голографического кодирования, матричного преобразования и оптимизации параметров предкодирования полезных данных.

Задачи исследования:

1. Разработать алгоритм повышения эффективности оценки частотного рассогласования и синхронизации на приемной стороне в каналах «спутник-Земля», «Земля-спутник» гибридных сетей связи.

2. Разработать метод снижения пик-фактора сигнала на передающей стороне для спутниковых каналов в гибридных сетях связи.

3. Разработать алгоритм формирования защитных интервалов на основе принципов голографического кодирования последовательностей данных в спутниковом и наземном сегментах гибридных сетей связи.

4. Разработать метод снижения количества пилот-сигналов в кадре для повышения эффективности использования частотного ресурса и пропускной способности без потери помехоустойчивости в спутниковых каналах гибридных сетей связи.

Научная новизна работы.

1. Разработан алгоритм повышения эффективности оценки частотного рассогласования на приемной стороне, **основанный** на корреляционном анализе пилот-сигналов в кадре, **отличающийся** совместным применением матричного преобразования, коррекцией фазовых скачков, выбора доминирующего значения оценки сдвига и взвешенного усреднения по амплитуде для поиска и компенсации статистических выборок полезного сигнала, подверженного замираниям в процессе распространения, **позволяющий** сохранить точность оценки и снизить значения СКО при высоких уровнях доплеровского сдвига в спутниковых каналах гибридных сетей связи.

2. Разработан метод снижения пик-фактора сигнала на передающей стороне для гибридных сетей связи, **основанный** на объединении методов предкодирования и формирующей фильтрации, **отличающийся** возможностью сглаживания формирующим фильтром боковых паразитных частотных составляющих сигнала, **позволяющий** снизить уровень пик-фактора без ухудшения вероятности битовой ошибки и снижения спектральной эффективности.

3. Разработан алгоритм формирования защитных интервалов для гибридных сетей связи, **основанный** на использовании уникальных слов, **отличающийся** применением голографического кодирования для генерации уникальной последовательности префикса, **позволяющий** обеспечить повышенную помехоустойчивость и устойчивость к доплеровскому сдвигу в условиях спутниковых каналов связи.

4. Разработан метод снижения количества пилот-сигналов в кадре для гибридных сетей связи, **основанный** на принципах голографического

кодирования, **отличающийся** способом формирования служебной последовательности, **позволяющий** повысить информационную емкость одного пилот-сигнала, сократить их количество и увеличить пропускную способность, не ухудшая помехоустойчивость сигнала.

Теоретическая и практическая значимость. Предложены новые методы повышения эффективности функционирования будущих гибридных систем связи на основе OFDM и DFT-s-OFDM. Разработаны методы, позволяющие точнее оценивать частотное рассогласование при высоких уровнях доплеровского сдвига за счёт применения матричного преобразования опорных структур (произведение Кронекера) и адаптивной статистической обработки; методы, способствующие снижению пик-фактора сигнала OFDM и DFT-s-OFDM на основе синергии предкодирования и формирующей фильтрации; методы, способствующие повышению пропускной способности за счёт применения принципов голографического кодирования в формировании защитных интервалов и пилот-сигналов.

С практической точки зрения предложенные решения позволяют расширить диапазон и повысить точность оценки частоты, снизить вероятность превышения пик-фактором уровня в 10 дБ на 1-2 порядка, уменьшить число пилот-сигналов на 33-75% и увеличить пропускную способность на 5-15%.

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение совместимо с инфраструктурой 5G и может быть использовано при построении систем 6G. Результаты работы применимы при проектировании современных наземно-спутниковых систем связи и представляют интерес для операторов и разработчиков телекоммуникационных технологий.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены на основе теории электрической связи и системного анализа. Использованы методы математического и компьютерного моделирования с использованием программных пакетов языка программирования MATLAB. Для экспериментального исследования применялось имитационное моделирование каналов связи с различными параметрами, а также практическая реализация предложенных методов с использованием программно-определяемого радио (SDR) на базе платформы HackRF.

Экспериментальная часть включала создание программно-аппаратного комплекса для тестирования разработанных алгоритмов в условиях, приближенных к реальным, что обеспечило верификацию предложенных решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм повышения эффективности оценки частотного рассогласования на приемной стороне для спутникового сегмента систем связи, функционирующих в гибридной архитектуре сетей связи 5G и 6G (соответствует п.1 паспорта специальности 2.2.15).

2. Метод снижения пик-фактора сигнала OFDM и DFT-s-OFDM на передающей стороне для спутникового сегмента гибридных сетей связи (соответствует п.7 паспорта специальности 2.2.15).

3. Алгоритм формирования защитных интервалов для спутникового сегмента гибридных сетей связи с применением принципов голографического кодирования (соответствует п.15 паспорта специальности 2.2.15).

4. Метод снижения количества пилот-сигналов в кадре для повышения эффективности использования частотного ресурса и пропускной способности без потери помехоустойчивости в спутниковых каналах гибридных сетей связи (соответствует п.15 паспорта специальности 2.2.15).

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием известных теоретических положений, корректностью используемых математических моделей и их соответствием реальным физическим процессам, а также подтверждается результатами имитационного моделирования и сравнением с существующими решениями.

Апробация результатов. Основные теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях, в том числе: XVI Всероссийская молодежная научная конференция "Мавлютовские чтения" (Уфа, 2022); Международная Урало-Сибирская конференция по биомедицинской инженерии, радиоэлектронике и информационным технологиям (Екатеринбург, 2022); XXIV Международная научно-техническая конференция "Проблемы техники и технологии телекоммуникаций" (Уфа, 2022; Казань, 2023; Самара, 2024; Уфа, 2025;).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 8 работ в сборниках трудов и материалах конференций, а также получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Все основные результаты, выносимые на защиту, включая структурные решения, математические модели и алгоритмы, представленные в работе, разработаны автором лично. Проработка цели и задач, способов их решения и вариантов представления результатов осуществлены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 168 стр., основной текст 129 стр., в том числе рисунков – 74, таблиц – 12, список литературы из 112 наименований на 16 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается актуальность исследуемой темы в контексте развития современных телекоммуникационных технологий. Сформулирован круг задач исследования, а также цель работы. Обоснованы

научная новизна и практическая ценность результатов, выносимых на защиту.

Первая глава посвящена критическому анализу основ функционирования гибридных сетей связи. Изучена специфика развития наземных и спутниковых беспроводных сетей в рамках актуальных 4G и 5G, а также перспективы внедрения технологий 6G в этих сегментах.

В ходе анализа литературы выделено предложение «гибридизации» беспроводных сетей связи путем интеграции наземного сегмента со спутниковыми системами для достижения глобального покрытия. Выделен ряд проблем, возникающих при такой интеграции: высокий уровень доплеровского сдвига (до 720 кГц для низкоорбитальных спутников), низкий уровень отношения сигнал/шум, нестабильность гетеродинов приемо-передающего оборудования, растущие требования систем передачи данных к энергоэффективности и пропускной способности.

Приведены общие теоретические сведения об актуальных технологиях организации беспроводных сетей передачи данных, таких как ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), ортогональное частотное мультиплексирование с использованием дискретного преобразования Фурье (DFT-s-OFDM) и их модификации, рассматривающие замену циклического префикса или варианта предкодирования.

Также проанализированы альтернативные перспективные технологии, рассматривающиеся в качестве потенциальных конкурентов OFDM и DFT-s-OFDM: AFDM и OTFS, рассмотрены их преимущества и недостатки с точки зрения потенциального повсеместного применения в гибридных сетях связи 6G. Параллельно с этим проведен анализ методов множественного доступа на базе OFDM и DFT-s-OFDM: множественного доступа с ортогональным частотным разделением (OFDMA), множественного доступа с локализованным частотным разделением (LFDMA) и множественного доступа с чередующимся частотным разделением (IFDMA). Описаны подходы к формированию опорных структур сигнала, в частности пилот-последовательностей и защитных интервалов: циклических префиксов (CP), уникальных слов (UW) и зануленных хвостов (ZT).

Значительное внимание в рамках анализа уделено известным методам оценки частотного рассогласования (CFO) в беспроводных сетях передачи данных, основанных на корреляционном анализе по опорным структурам сигнала (префиксам, преамбулам, пилот-сигналам). Систематизированы известные методы снижения пик-фактора сигнала (PAPR): схемотехнические методы, клиппинг, метод селективного отображения (SLM), скремблирование, формирующая фильтрация.

Рассмотрен подход к повышению помехоустойчивости спутниковых каналов связи, на основе использования голографического кодирования, основанного на математическом моделировании голограммы цифрового сообщения в виртуальном пространстве. Анализ показал, что голографические методы особенно перспективны для защиты служебной

информации, которая передается в пилот-сигналах и самих защитных интервалах, где важна высокая надежность передачи, устойчивость к сильным замираниям и доплеровскому рассогласованию в спутниковых каналах связи.

В работе для решения оценки и компенсации частотного рассогласования при высоких значениях доплеровского сдвига предложено использовать математический аппарат тензорного анализа на основе произведения Кронекера массивов опорных структур принятых ортогональных сигналов.

В ходе критического анализа выявлены существенные недостатки современных решений в контексте применения в спутниковом сегменте гибридных сетей связи. Это недостаточная точность оценки CFO при значительном доплеровском сдвиге (классические методы теряют устойчивость при $|\varepsilon| > 0.5$), неизбежный компромисс между снижением уровня пик-фактора и спектральной эффективностью, а также уязвимость служебной информации к различного рода помехам, свойственным каналам «спутник-Земля» и «Земля-спутник». На основании вышесказанного были сформулированы задачи исследования.

Вторая глава диссертационной работы сфокусирована на разработке оригинальных методов и алгоритмов, направленных на решение ключевых проблем интеграции спутникового и наземного сегментов в рамках организации гибридных сетей связи, которые были определены в первой части исследования.

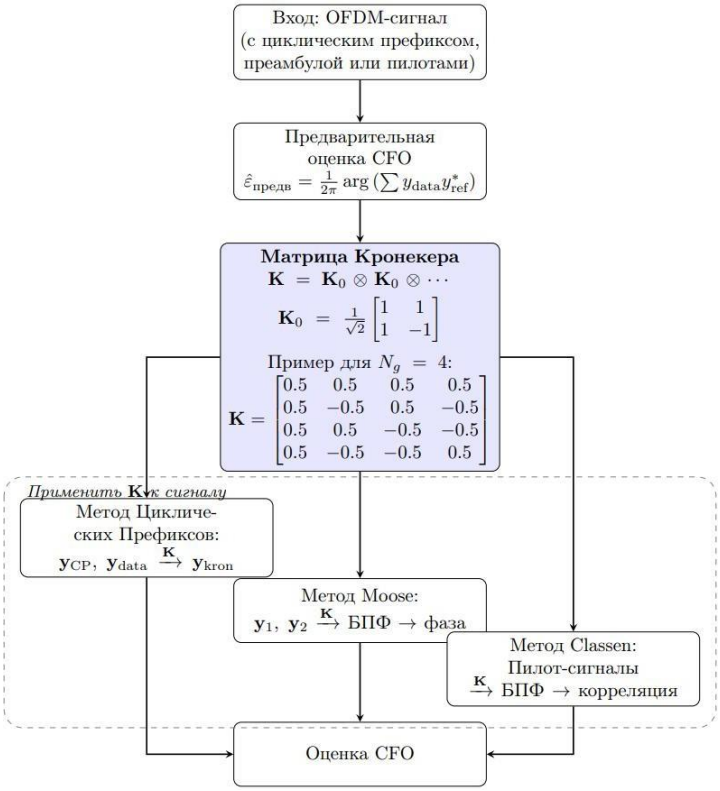


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма повышения эффективности оценки и компенсации частотного рассогласования для высоких уровней доплеровского сдвига

Предложен алгоритм, существенно повышающий точность оценки частотного рассогласования на приемной стороне. В его основе положено матричное преобразование опорных структур сигнала с использованием произведения Кронекера, необходимое для расширения статистической выборки без увеличения длительности символа.

Дополнительно применены методы адаптивной статистической обработки: коррекция фазовых скачков ($\pm 2\pi$) и взвешенное усреднение по амплитуде в области, примыкающей к теоретическому пределу однозначной оценки $|\varepsilon| < 0.5$.

Внедрение преобразования Кронекера как одного из этапов обработки данных, увеличивает общее число операций, при этом не меняет порядок асимптотической сложности алгоритмов. Это обеспечивает возможность их реализации на бортовых DSP и ПЛИС без превышения допустимых временных задержек.

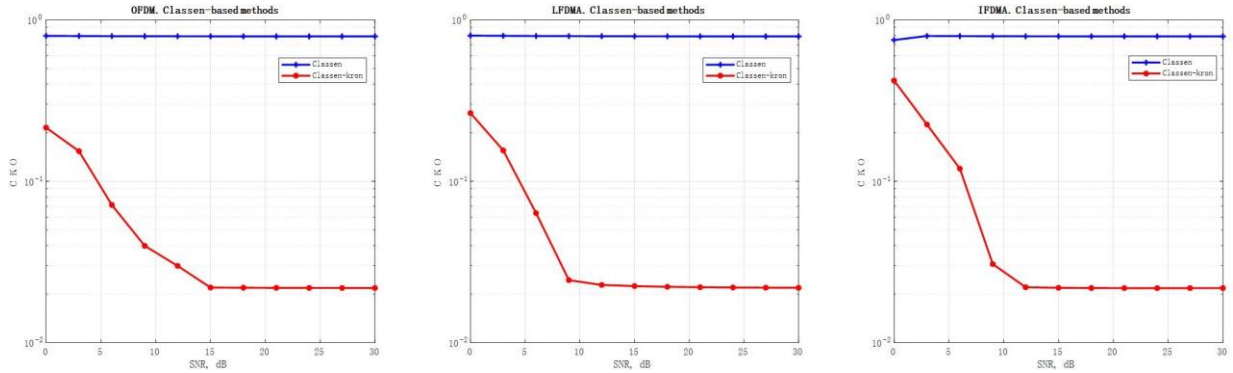


Рисунок 2 – Сравнение работы стандартного метода оценки по пилот-сигналам с его вариантом, улучшенным за счет предложенного алгоритма

Разработан метод снижения пик-фактора, который основан на совместном применении методов предкодирования и формирующей фильтрации сигнала.

Поиск конфигураций фазовых углов для базовой матрицы предкодирования осуществляется при помощи таблицы поиска, которая строится, ориентируясь на данные значений SNR и PAPR (минимальный пик-фактор при определенном отношении с/ш), с последующим масштабированием матрицы через произведение Кронекера.

Дополнительно задействован формирующий фильтр на базе Optimized «Better Than Raised Cosine» с локальным применением окна Тьюки, Enhanced Optimized «Better Than Raised Cosine» (EOBTRC), позволяющий сглаживать переходные участки импульса без значительного ухудшения подавления внеполосного излучения.

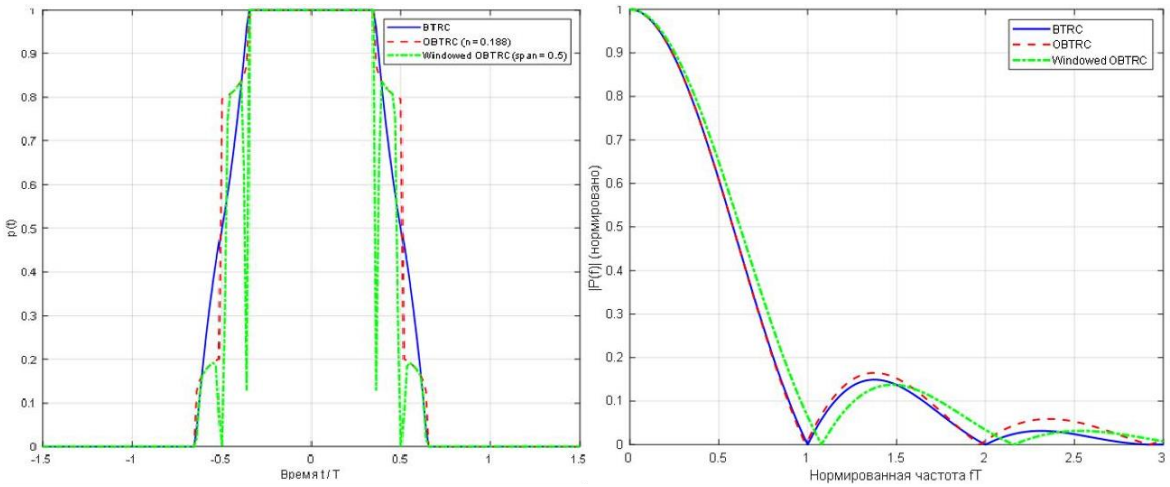


Рисунок 3 – Характеристики фильтров семейства BTRC в сравнении с предложенным фильтром EOBTRC

Для подтверждения эффективности предложенных решений проведено имитационное моделирование с использованием реалистичных доплеровских профилей (сформированных в соответствии с рекомендациями 3GPP по неназемным сетям NTN [3GPP TR 38.811, TR 38.821]) для негеостационарных спутников.

В моделировании учтены следующие параметры: высота орбиты (600 км), скорость спутника (7623 м/с), несущая частота (4.895 ГГц), шаг разнесения поднесущих в OFDM/DFT-s-OFDM (240 кГц), а также разные модели канала распространения (многолучевой, с райсовским или рэлеевским замиранием).

Значение $\varepsilon \approx 0.5183$ целенаправленно выбрано для тестирования граничных условий, находящихся за пределами теоретического предела однозначной оценки частотного рассогласования классическими методами.

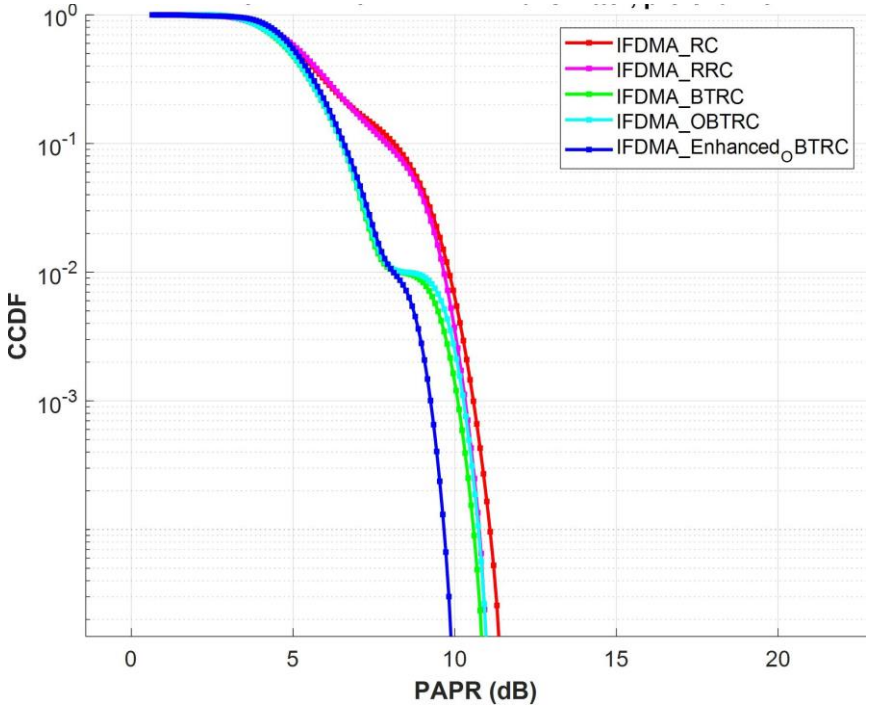


Рисунок 4 – Пик-фактор на передатчике для IFDMA

Третья глава описывает разработку концепции применения принципов голографического кодирования для работы со служебной информацией в гибридных сетях связи.

В процессе исследования был разработан алгоритм формирования голографических защитных интервалов на основе априорных уникальных слов (UW) и взаимодействия с математической моделью Френеля, блок-схема которого представлена на рисунке 5.

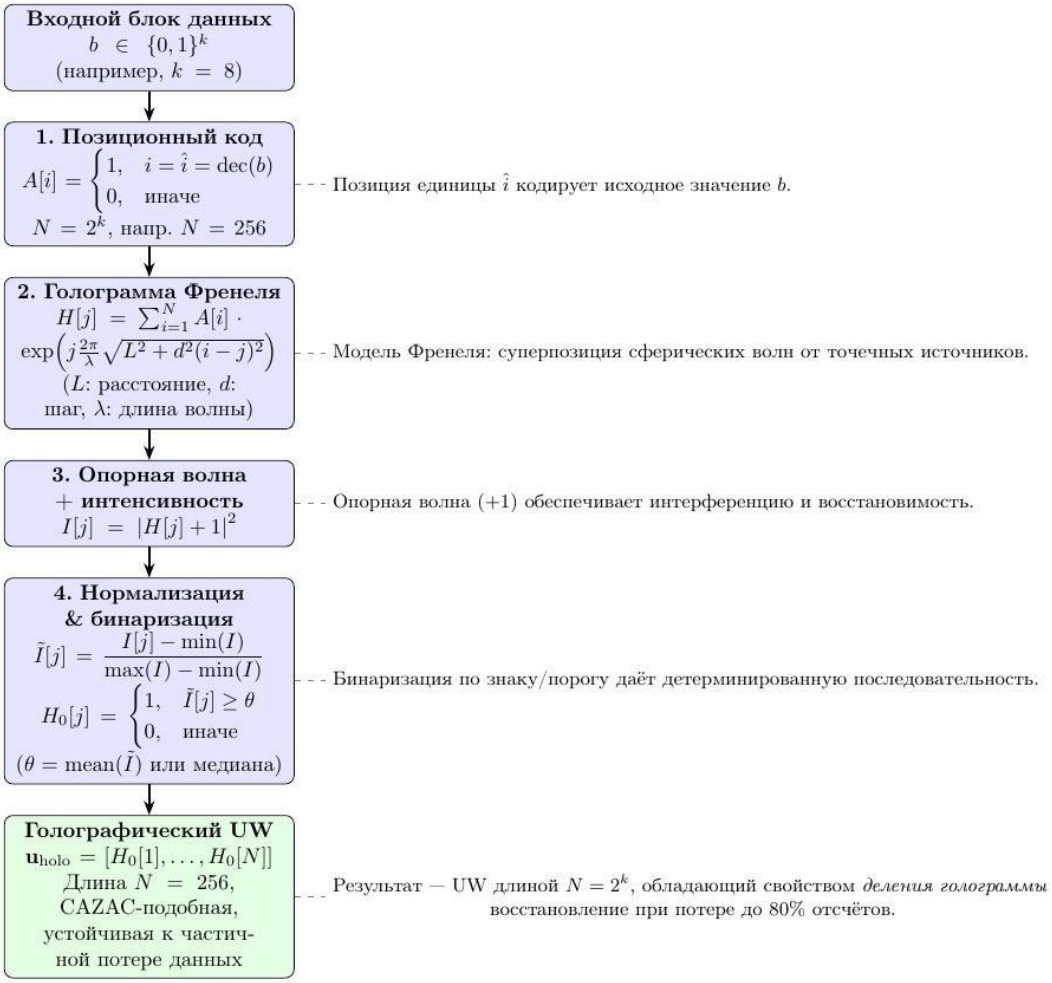
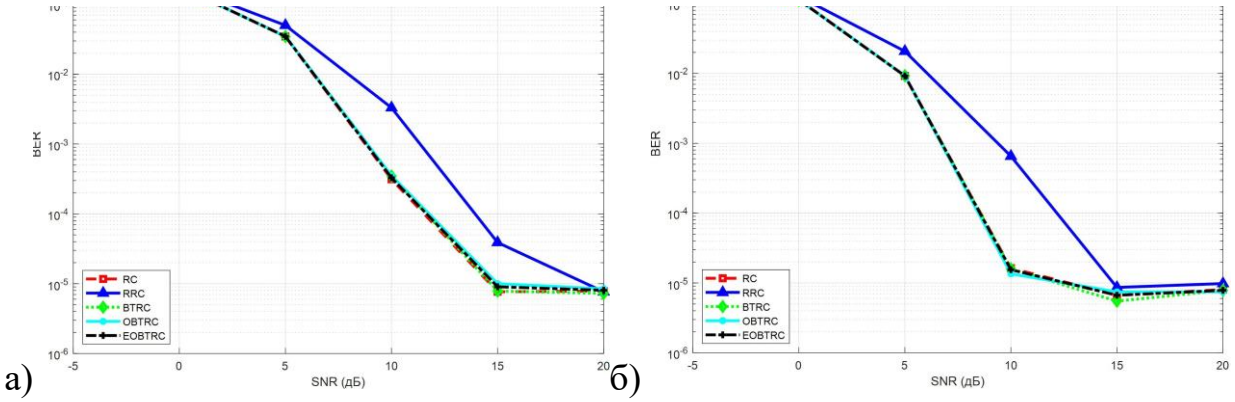


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма формирования голографического префикса (голографического защитного интервала)

В отличие от традиционных подходов, метод отличается использованием нормированного значения пик-фактора в качестве управляющей переменной для позиционирования импульса в объектной плоскости голограммы, а также фазовой характеристики сигнала для модуляции фазы выходной последовательности. Это обеспечивает адаптивное формирование UW под каждый символ и повышает устойчивость к частичной потере данных.



а) б)

Рисунок 6 – Графики зависимости коэффициента битовой ошибки (BER) к отношению сигнал/шум (SNR) в канале АБГШ для а) последовательности Задова-Чу (20% символа); б) последовательности голографического префикса (6% символа);

Таблица 1. Коэффициент битовой ошибки в канале АБГШ для последовательностей Задова-Чу и голографической.

С/Ш	**BER, АБГШ, EOBTRC-LFDMA, Zadoff-Chu, 1/4**	**BER, АБГШ, EOBTRC-LFDMA, HoloUW, 1/4**	**BER, АБГШ, EOBTRC-LFDMA, HoloUW, 1/16**
-5	0,3276	0,25597	0,27598
0	0,18093	0,09216 (↓)	0,11349 (~)
5	0,03483	0,00514 (↓)	0,00922 (↓)
10	3,29E-04	8,636935E-06 (↓)	1,5507E-05 (↓)
15	9,03E-06	9,225817E-06 (~)	6,6740E-06 (↓)
20	8,05E-06	8,048053E-06 (~)	7,8518E-06 (~)

Также предложен метод голографического кодирования служебных последовательностей пилот-сигналов путем преобразования фиксированного k-битового блока в голографическую структуру, обеспечивающую восстановление исходного блока по фрагменту сигнала.

В отличие от защитных интервалов, где базой служат характеристики самого сигнала, в пилот-сигналах входной блок интерпретируется как служебный идентификатор (тип системы, режим работы, оценка SNR).

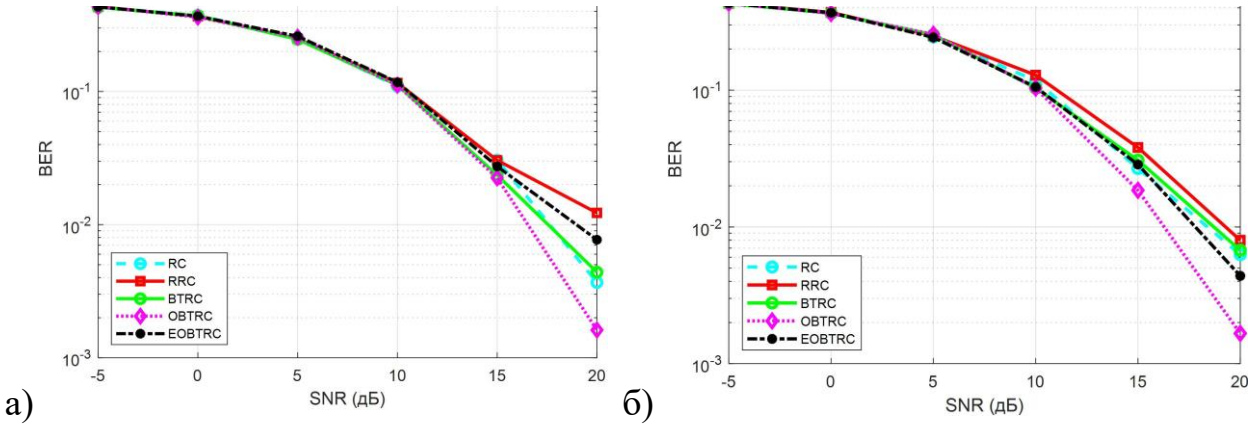


Рисунок 7 – Графики зависимости коэффициента битовой ошибки (BER) к отношению сигнал/шум (SNR) в многолучевом канале при: а) 64 стандартных пилот-сигналах на 256 поднесущих; б) 16 голографически закодированных пилот-сигналах на 256 поднесущих;

Данный метод позволяет повысить информационную емкость одного «пилота» и снизить количество используемых при передаче пилот-сигналов.

В главе приведены результаты имитационного моделирования и результаты разных метрик оценки сигнала: зависимости вероятности битовой ошибки (BER), оценки пик-фактора (PAPR) и частотного рассогласования (CFO) при использовании голографически закодированных защитных интервалов и пилот-сигналов в исследуемых технологиях обработки сигналов.

Экспериментальная верификация результатов, полученных путем имитационного моделирования во второй и третьей главах работы, проведена на реальном оборудовании.

В качестве аппаратной платформы была выбрана система программно-определяемого радио модели HackRF One. Выбор именно этой модели обусловлен гибкостью настройки и доступностью для поставленных исследовательских задач. Для программной реализации алгоритмов использовалась среда GNU Radio в комбинации с Python и Matlab.

Полученные экспериментальные данные подтвердили работоспособность предложенных методов в реальных условиях, что важно для практического внедрения полученных результатов. Границы применимости лабораторного стенда определены как $SNR > 10$ дБ и $|\varepsilon| \quad 0.55$.

Аппаратные ограничения платформы HackRF One (полудуплексный режим, ограниченный динамический диапазон АЦП/ЦАП) не позволяют в полной мере эмулировать нестационарный канал «спутник-Земля» с экстремальными значениями отношения сигнал/шум и доплеровских сдвигов.

В ходе проводимых исследований был выявлен ряд противоречий и компромиссов, на основе которых предложено разработать

многокритериальную задачу по оптимизации применения описанных методов в контексте сценариев для геостационарных и негеостационарных спутников в спутниковом сегменте будущих гибридных сетей связи. При формировании условий задачи упор был сделан на известные спецификации 3GPP Release 17+ и требования перспективных стандартов NTN для сетей 6G.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе были рассмотрены вопросы формирования гибридных сетей связи пятого и шестого поколения. Рассмотрены проблемы потенциальной интеграции наземного и спутникового сегментов сетей связи, такие как: снижение точности синхронизации в условиях значительного доплеровского сдвига, низкая энергоэффективность передачи вследствие высокого пик-фактора сигнала, а также компромисс между помехоустойчивостью и пропускной способностью в гибридных сетях связи.

1. В рамках решения первой задачи исследования разработан алгоритм повышения эффективности оценки частотного рассогласования на приёмной стороне для спутникового сегмента гибридных систем связи, основанный на корреляционном анализе опорных структур сигнала OFDM и DFT-s-OFDM, отличающиеся применением матричного преобразования опорных структур сигнала (произведение Кронекера), а также применением методов статистической обработки (адаптивной коррекции фазовых скачков ($\pm 2\pi$) и взвешенного усреднения по амплитуде) в области, непосредственно примыкающей к теоретическому пределу однозначной оценки $|\varepsilon| < 0.5$, где классические методы теряют устойчивость из-за неоднозначности фазы.

Предложенные модификации помогают расширить окно декодирования, полученные результаты включают снижение СКО:

- с 10^{-1} до 10^{-3} (OFDM) и с $7{,}8 \cdot 10^{-1}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ (LFDMA/IFDMA) в АБГШ-канале;
- с 10^{-1} до 10^{-3} (OFDM) в канале с многолучевостью; с $7{,}8 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ (OFDM);
- с $7{,}8 \cdot 10^{-1}$ до $3{,}6 \cdot 10^{-2}$ (LFDMA/IFDMA) в канале с райсовским распределением.

В наиболее сложных условиях канала Рэлея также показана положительная динамика снижения СКО (до 30% в OFDM).

2. Для решения второй задачи представлен метод снижения пик-фактора сигнала на передающей стороне для спутникового сегмента гибридных систем связи, основанный на объединении методов предкодирования и формующей фильтрации сигнала, отличающийся предкодированием поднесущих частот с применением матрично-преобразованной аналитически подобранной базовой матрицы фазовых

задержек, а также задействованием формирующего фильтра на базе Optimized «Better Than Raised Cosine» с локальным применением окна Тьюки (Enhanced Optimized «Better Than Raised Cosine», EOBTRC), позволяющий снизить уровень пик-фактора сигнала и его деградации в сложных каналах для OFDM и DFT-s-OFDM систем, снизив требования к схемотехническим решениям, применяемым технике, подходящей для реализации гибридных сетей связи.

Важно отметить, что эффективность метода носит адаптивный характер и зависит от типа канала распространения: в рэлеевском канале достигнуто снижение пик-фактора на 2,5 дБ (для BTRC-фильтра), в канале Райса и многолучевом канале, наоборот, наблюдается незначительная деградация уровня PAPR, которая, тем не менее, компенсируется выигрышем в помехоустойчивости и спектральной эффективности.

Применение разработанного метода обеспечивает уровень пик-фактора в 10 дБ с вероятностью до $1{,}02 \cdot 10^{-5}$ для IFDMA, $7{,}98 \cdot 10^{-5}$ для LFDMA и $4{,}87 \cdot 10^{-5}$ для OFDM, что на 2-3 порядка превосходит показатели традиционных методов формирующей фильтрации без дополнительного предкодирования.

Совместное применение предложенных методов (EOBTRC-фильтрация и предкодирование) выделяется для IFDMA, обеспечивая дополнительное снижение вероятности возникновения 10 дБ пик-фактора до 10^{-6}. При этом установлено, что при использовании других формирующих фильтров предкодирование оказывает на уровень пик-фактора негативное влияние, что свидетельствует об адаптивном характере решения и делает его неуниверсальным.

3. В рамках решения третьей задачи разработан алгоритм формирования защитных интервалов для спутникового сегмента гибридных систем связи, основанный на использовании уникальных слов (Unique Word, UW) и принципов голографического кодирования (математической модели Френеля), отличающийся использованием энергетической характеристики сигнала (нормированного пик-фактора) в качестве управляющей переменной для позиционирования импульса в объектной плоскости голограммы, а также фазовой характеристики сигнала для модуляции фазы выходной последовательности.

Экспериментально подтверждена возможность сокращения доли защитного интервала в длине символа 20% до 6% при сохранении приемлемого уровня BER. Сокращение общей длины символа обеспечивает повышение эффективности использования частотно-временного ресурса на 15% при сохранении помехоустойчивости.

При этом установлено, что влияние голографического префикса (HoloUW) на пик-фактор носит нелинейный характер, зависит от типа формирующего фильтра: для фильтров семейства RC наблюдается снижение

вероятности превышения пик-фактором определенного порога (на 10-20%), однако в комбинации с фильтрами семейства BTRC и предложенным в работе EOBTRC зафиксировано ухудшение показателей уровня PAPR относительно вариантов с известными последовательностями Задова-Чу в качестве префиксов (до 47%).

Это указывает на необходимость адаптивной оптимизации типа кодирования и формирующей фильтрации под конкретные сценарии эксплуатации, что также учтено в предложениях по дальнейшему развитию работы.

4. При решении четвертой поставленной задачи разработан метод снижения количества пилот-сигналов в каналах спутникового сегмента гибридных систем связи, основанный на принципах голографического кодирования (математической модели Френеля), отличающийся методом формирования служебной последовательности путем внесения голографической избыточности в базовую последовательность пилот-сигналов, позволяющий повысить информационную емкость одного «пилота», а также сократить их общее количество сократить количество пилот-сигналов на 75% (с 32 до 8 на 256 поднесущих) при сохранении эквивалентного качества оценки канала в различных условиях распространения.

Экспериментально подтверждено, что использование сниженного количества голографических пилот-сигналов (доля до 25% от стандартного количества) обеспечивает BER сопоставимый с результатами, зафиксированными при использовании стандартной пилот-последовательности, во всех типах каналов:

- для канала АБГШ при отношении сигнал/шум в 10 дБ значения BER составляют $6.53 \cdot 10^{-6}$ против $5.74 \cdot 10^{-6}$;

- для многолучевого канала при SNR 25 дБ – $2.31 \cdot 10^{-4}$ против $2.01 \cdot 10^{-4}$;

- для канала Райса при SNR 25 дБ – $1.54 \cdot 10^{-2}$ против $4.69 \cdot 10^{-2}$.

Доля информационных поднесущих при этом возрастает с 75% до 93.75%, что приводит к повышению спектральной эффективности системы связи на 25% без модификации аппаратной части и без деградации коэффициента битовых ошибок.

5. Экспериментальная верификация позволила выявить границы применимости предложенных алгоритмов и их несовместимость в рамках некоторых сценариев работы на лабораторном SDR-стенде. Для дальнейшего развития идей, представленных в диссертационном исследовании, предлагается создать многокритериальную модель оптимизации, направленную на адаптивный выбор конфигурации передатчика под конкретные условия эксплуатации.

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению в производственные процессы компании ООО «Спутникс» г. Москва в рамках совместного проекта по созданию и запуску малого космического аппарата «УУНиТ-САТ» (Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2026-359 от 21.05.2026 г.) для тестовых испытаний и отладки функционирования полезной нагрузки системы передачи данных, а также интегрированы в учебные процессы ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологии» по направлениям 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи».

Перспективы дальнейшей разработки темы. Рассматривается возможность развития адаптивности сопряжения предложенных методов путем постановки и решения задачи многокритериальной оптимизации на основе фронта Парето, интегрирующей разработанные методы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х. Исследование методов оценки и компенсации частотного рассогласования в системах связи 6G с технологией DFT-S-OFDM в каналах с райсовскими и рэлеевскими замираниями // Инфокоммуникационные технологии. – 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 14–22.

2. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Харенко А.А., Мешкова А.Г. Анализ методов снижения пик-фактора сигнала в условиях влияния эффекта Доплера в гибридных сетях связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2024. – Т. 27. – № 3. – С. 61–70.

3. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л., Мешкова А.Г. Разработка и исследование метода компенсации частотного рассогласования на основе использования уникальных слов в системах спутниковой связи 5G и 6G // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7.

4. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л., Мешкова А.Г. Разработка метода компенсации частотного рассогласования в спутниковых каналах связи на основе оптимизации формирующих фильтров // Инфокоммуникационные технологии. – 2025. – Т. 23. – № 2 (90). – С. 27–36.

5. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л., Мешкова А.Г. Разработка метода снижения пик-фактора сигнала для ортогональных методов доступа на основе использования формирующих фильтров в гибридных сетях связи // Вестник СибГУТИ – 2026. Т. 20. – № 2. С. 45–60.

6. Сальников Р.О., Голографическое кодирование служебных последовательностей в гибридных системах связи пятого и шестого поколений с использованием низкоорбитальных спутников // Инфокоммуникационные технологии. – 2026. – Т. 24. – № 2 (94).

Материалы конференций

7. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Проверка работоспособности методов оценки частотного рассогласования в системах связи с технологией DFT-S-OFDM для различных методов доступа // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях. Материалы XXIV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. – Уфа, 2023. – С. 165–167.

8. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Использование произведения Кронекера при оценке и компенсации рассогласования в системах связи с технологией OFDM и DFT-S-OFDM // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях. Материалы XXIV Международной научно-технической конференции. – Уфа, 2023. – С. 169–170.

9. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Харенко А.А., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л., Мешкова А.Г. Оценка и компенсация частотного рассогласования в условиях канала спутник-земля для низкоорбитальных систем // VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023. Материалы XXV Международной научно-технической конференции. – Казань, 2023. – С. 215–217.

10. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Виноградова И.Л., Мешкова А.Г. Расчет вероятности появления битовой ошибки в условиях влияния эффекта Доплера при передаче данных в низкоорбитальных спутниковых системах // VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023. Материалы XXV Международной научно-технической конференции. – Казань, 2023. – С. 221–223.

11. Хантимерова Э.З., Гизатулин А.Р., Мешков И.К., Загидуллин А.Н., Сальников Р.О. Разработка метода снижения пик-фактора в оптической системе связи с OFDM на основе произведения Кронекера // VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023. Материалы XXV Международной научно-технической конференции. – Казань, 2023. – С. 44–46.

12. Сальников Р.О. Методы оптимизации сигнально-кодовых конструкций в гибридных сетях связи // Мавлютовские чтения. Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции. – Уфа, 2024. – С. 232–236.

13. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л. Голографическое кодирование пилот-сигналов для повышения пропускной способности спутникового сегмента конвергентных

систем связи // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Материалы XXV Международной научно-технической конференции. – Уфа, 2025. – С. 289–290.

14. Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л. Метод формирования защитных интервалов на основе голографического кодирования для спутникового сегмента конвергентных систем связи // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Материалы XXV Международной научно-технической конференции. – Уфа, 2025. – С. 293–294.

Результаты интеллектуальной деятельности (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ)

15. Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Сальников Р.О. Программный комплекс по имитации оценки и компенсации частотного и временного рассогласования в DFT-S-OFDM: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2022664592. – Заявка № 2022664175 от 27.07.2022. – Зарег. 02.08.2022.

16. Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Сальников Р.О. Программный комплекс для оценки и компенсации частотного рассогласования в оптоволоконных когерентных системах передачи с OFDM: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023611282. – Заявка № 2023610180 от 09.01.2023. – Зарег. 18.01.2023.

17. Сальников Р.О. Программный комплекс для анализа данных с использованием голографических пилот-сигналов, передаваемых по средствам программно-определяемого радио: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025687359. – Заявка № 2025686129 от 26.09.2025. – Зарег. 09.10.2025.

18. Сальников Р.О. Программный комплекс для генерации и анализа технологий обработки потоков данных с голографическими пилот-сигналами в системах беспроводной связи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025687795. – Заявка № 2025686076 от 26.09.2025. – Зарег. 15.10.2025.

Диссертант  Р.О. Сальников