УТВЕРЖДАЮ:
проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Уфимский
университет науки и технологий»
доктор физ-мат. наук, доцент
_____И.Ф. Шарафуллин
«19» 06 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Диссертация «Разработка методов повышения эффективности функционирования гибридных систем связи с использованием низкоорбитальных спутников» выполнена на кафедре телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Сальников Роман Олегович обучался в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по специальности 2.2.15 Сети, системы и устройства телекоммуникаций и работал инженером Управления научных исследований и разработок ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В настоящее время работает ассистентом кафедры телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В 2022 г. окончил ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по специальности 11.05.04 Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи.

В 2026 г. окончил очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по научной специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2026 г. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Султанов Альберт Ханович, профессор кафедры телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Диссертация Сальникова Романа Олеговича является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), в которой содержатся научно обоснованные результаты решения задачи повышения точности синхронизации, энергоэффективности и помехоустойчивости в спутниковом и наземном сегментах гибридных систем связи на основе принципов голографического кодирования, матричного преобразования и оптимизации параметров предкодирования полезных данных.

2. **Личный вклад соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации,** заключается в формулировке научной задачи, определении объекта и цели исследования, а также постановке задач исследования с последующим их решением.

Соискателем лично получены все основные результаты, выносимые на защиту:

- алгоритм повышения эффективности оценки частотного рассогласования на приемной стороне, основанный на корреляционном анализе пилот-сигналов. Данный алгоритм отличается совместным применением матричного преобразования (произведения Кронекера), коррекцией фазовых скачков и взвешенным усреднением по амплитуде. Он позволяет позволяющий расширить окно однозначной оценки за пределы $|\varepsilon| > 0{,}5$ и снизить среднеквадратическую ошибку на 1-2 порядка (до 10^{-3} для OFDM и до $3 \cdot 10^{-2}$ для LFDMA/IFDMA) в условиях высоких доплеровских сдвигов по сравнению с классическими методами;

- метод снижения пик-фактора сигнала на передающей стороне, основанный на объединении методов предкодирования и формирующей фильтрации. В рамках объединения задействована изобретенная автором модель формирующего фильтра EOBTRC, позволяющая снизить вероятность превышения пик-фактором уровня 10 дБ на 2-3 порядка (до значений $1{,}02 \cdot 10^{-5}$ для IFDMA, $7{,}98 \cdot 10^{-5}$ для LFDMA и $4{,}87 \cdot 10^{-5}$ для OFDM) без деградации вероятности битовой ошибки;

- алгоритм формирования защитных интервалов на основе уникальных слов и математической модели Френеля, который отличается использованием нормированных значений пик-фактора и фазовой характеристики сигнала для собственной модуляции. Данный алгоритм позволяет сократить долю защитного интервала в длине символа с 20% до 6% при обеспечении коэффициента битовой ошибки (BER) на уровне $3{,}45 \cdot 10^{-4}$ (при SNR = 20 дБ в канале АБГШ), что почти на три порядка лучше показателей классических последовательностей Задова-Чу;

- метод снижения количества пилот-сигналов в кадре. В основе этого метода – принципы голографического кодирования. Данный метод позволяет повысить информационную емкость одного пилот-сигнала, сократив плотность распределения пилот-сигналов на 75% (например, с 32 до 8 на 256 поднесущих)

при сохранении эквивалентного качества оценки канала (BER ~10^{-6} при SNR = 10 дБ в канале АБГШ), что приводит к росту спектральной эффективности системы на 20-25%.

В перечисленных в диссертации работах соискателем лично получены следующие результаты:

- в работах [17], [18], [92] проведен сравнительный анализ и предложена модификация методов оценки частотного рассогласования в системах с технологией DFT-s-OFDM в каналах с замираниями, основанная на применении матричного преобразования (произведения Кронекера) для повышения точности оценки при высоких доплеровских сдвигах;
- в работах [23], [32], [70] разработаны методы компенсации частотного рассогласования для спутниковых каналов связи на основе использования уникальных слов (UW) и оптимизации параметров формирующих фильтров;
- в работах [56], [67], [72] исследовано влияние эффекта Доплера на пик-фактор сигнала и предложен метод его снижения на основе локальной формирующей фильтрации (разработан фильтр EOBTRC), обеспечивающий сохранение спектральной эффективности;
- в работе [93] показано потенциальное применение произведения Кронекера для построения матриц передачи с целью распределения мощности сигнала и снижения пик-фактора;
- в работе [24] выполнен расчет вероятности битовой ошибки в низкоорбитальных спутниковых системах с учетом дестабилизирующего влияния эффекта Доплера;
- в работах [104], [105], [106] разработаны алгоритмы голографического кодирования служебных последовательностей (пилот-сигналов и защитных интервалов на базе уникальных слов), позволяющие повысить информационную емкость опорных тонов и сократить долю служебной нагрузки без деградации помехоустойчивости;
- по результатам алгоритмических разработок созданы и зарегистрированы 4 программных комплекса [109-112] для имитационного моделирования, оценки частотного рассогласования и экспериментальной верификации предложенных решений на SDR-платформах.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационного исследования.

Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – [17], [18], [23], [24], [32], [56], [67], [70], [72], [92], [93]; по главе 2 – [18], [56], [67], [70], [92], [93]; по главе 3 – [32], [56], [104], [105], [106], [109], [110], [111], [112]. Одна работа написана автором единолично, автор является единственным обладателем двух свидетельств на программы для ЭВМ. Остальные работы написаны совместно с научным руководителем или другими членами научного коллектива.

3. **Достоверность полученных результатов и выводов** обеспечивается использованием известных теоретических положений, корректностью математических моделей и их соответствием реальным физическим процессам, результатами имитационного моделирования в среде MATLAB, а также

экспериментальной верификацией на лабораторном SDR-стенде на базе платформы HackRF One. Результаты работы апробированы на международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в изданиях из Перечня ВАК и подтверждены актами о внедрении в производственную и образовательную сферы.

4. Научная новизна работы заключается в следующем:

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 выбросов полезного сигнала, *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.

5. Практическая значимость заключается в следующем:

Полученные в диссертационном исследовании результаты позволяют:

- расширить диапазон и повысить точность оценки частоты в условиях экстремального доплеровского сдвига, снижая СКО оценки до 10^{-3}, что критически важно для прямой сотовой связи со спутника (direct-to-cell);
- повысить энергоэффективность бортовых и наземных передатчиков за счет снижения вероятности возникновения пик-фактора свыше 10 дБ на 2-3 порядка (до значений $10^{-5}…10^{-6}$), что позволяет усилителям мощности работать ближе к точке насыщения без нелинейных искажений;
- увеличить пропускную способность и спектральную эффективность спутниковых линий связи на 15-25% за счет радикального сокращения служебной нагрузки: уменьшения длины защитного интервала до 6% и

сокращения количества пилот-сигналов на 75% без потери помехоустойчивости;

- унифицировать процессы верификации алгоритмов: разработанные программные модули успешно прошли экспериментальную проверку на SDR-стенде (HackRF One), где было зафиксировано снижение PAPR на 2,74 дБ при использовании голографических структур по сравнению с базовым сценарием;

- разработанное программно-алгоритмическое обеспечение совместимо с инфраструктурой 5G и может быть использовано при построении систем 6G.

Результаты диссертационного исследования внедрены:

1. В производственную деятельность ООО «СпутникС» (г. Москва) в рамках совместного проекта по созданию и запуску малого космического научно-образовательного 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.
2. В учебный процесс ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по направлениям подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи» при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам: «Технологии обработки мультимедийных данных», «Системы цифрового телерадиовещания и спутникового позиционирования», «Системы подвижной связи специального назначения», «Радиорелейные и спутниковые системы передачи специального назначения» с использованием программно-аппаратного комплекса на базе SDR-платформ (HackRF One, GNU Radio, MATLAB).

6. Ценность научных работ заключается в том, что:

Результаты исследований дополняют теорию построения гибридных наземно-спутниковых сетей связи 5G/6G, предлагают новые подходы к решению проблем синхронизации, энергоэффективности и спектральной эффективности, открывая перспективы для адаптивной многокритериальной оптимизации бортовых и наземных терминалов.

7. Обоснование выбранной специальности и отрасли науки диссертации

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, при этом работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

п. 1 «Разработка и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций»;

п. 3 «Исследование процессов представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио-, голографической и мультимедиа информации; разработка и совершенствование соответствующих алгоритмов и процедур»;

п. 15 «Исследование и разработка новых сигналов, а также соответствующих модемов, кодеков, мультиплексоров и селекторов,

обеспечивающих высокую надежность и качество обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех».

Отрасль науки – – технические науки, поскольку полученные результаты имеют непосредственное инженерное применение, направлены на повышение технических характеристик гибридных систем связи (точности синхронизации, энергоэффективности, пропускной способности) и могут быть использованы при проектировании реальных устройств беспроводной связи.

8. Полнота изложения материалов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ и результатов интеллектуальной деятельности, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 8 работ в сборниках трудов и материалах конференций. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором, достаточная.

Общий объем публикаций – 4,65 п.л., авторский вклад – 1,55 п.л.

Статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI

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

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

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

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

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

6. Голографическое кодирование служебных последовательностей в гибридных системах связи пятого и шестого поколений с использованием

низкоорбитальных спутников / Р. О. Сальников // Инфокоммуникационные технологии. – 2026. – № 2. – (в печати).

Другие публикации по теме диссертации

7. Проверка работоспособности методов оценки частотного рассогласования в системах связи с технологией DFT-s-OFDM для различных методов доступа / И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин, Р. О. Сальников // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 167–168.

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

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

10. Методы оптимизации сигнально-кодовых конструкций в гибридных сетях связи / Р. О. Сальников // Мавлютовские чтения: материалы XVIII Всерос. молодёжной науч. конф. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 232–236.

11. Использование произведения Кронекера при оценке и компенсации рассогласования в системах связи с технологией OFDM и DFT-S-OFDM / Р. О. Сальников, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 169–170.

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

13. Голографическое кодирование пилот-сигналов для повышения пропускной способности спутникового сегмента конвергентных систем связи / Р. О. Сальников, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин, А. Х. Султанов, А. Л. Тимофеев // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа, 2025. – С. 289–290.

14. Метод формирования защитных интервалов на основе голографического кодирования для спутникового сегмента конвергентных систем связи / Р. О. Сальников, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин, А. Х. Султанов, А. Л. Тимофеев // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа, 2025. – С. 293–294.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664592 Российская Федерация. Программный комплекс по имитации оценки и компенсации частотного и временного рассогласования в DFT-S-OFDM: № 2022664175; заявл. 27.07.2022; опубл. 02.08.2022 / И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин, Р. О. Сальников; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный университет».

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611282 Российская Федерация. Программный комплекс для оценки и компенсации частотного рассогласования в оптоволоконных когерентных системах передачи с OFDM: № 2023610180; заявл. 09.01.2023; опубл. 18.01.2023 / И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин, Р. О. Сальников; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687795 Российская Федерация. Программный комплекс для генерации и анализа технологий обработки потоков данных с голографическими пилот-сигналами в системах беспроводной связи: № 2025686076; заявл. 26.09.2025; опубл. 15.10.2025 / Р. О. Сальников.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687359 Российская Федерация. Программный комплекс для анализа данных с использованием голографических пилот-сигналов, передаваемых по средствам программно-определяемого радио: № 2025686129: заявл. 26.09.2025; опубл. 09.10.2025 / Р. О. Сальников.

Диссертация Сальникова Романа Олеговича соответствует п. 14 Положения о порядке присуждении ученых степеней:

- отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации;
- соискатель ссылается на авторов и источники заимствования.

Диссертация «Разработка методов повышения эффективности функционирования гибридных систем связи с использованием низкоорбитальных спутников» Сальникова Романа Олеговича рекомендуется к защите на соискание

ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Заключение принято на заседании кафедры телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Присутствовало на заседании 23 человек, в том числе 5 докторов наук по научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Результаты голосования: «за» – 23 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Протокол №9 от «18» июня 2026 г.

Заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, к.т.н., доцент Г.С. Воронков

ДЛЯ ДОКУМЕНТОВ 2

Подпись Воронкова Г.С.
Удостоверяю «18» 06 2026 г.
Начальник общего отдела УУНиТ Рахимова А.Р.