

На правах рукописи

Ермолаев Григорий Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ
МОБИЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Мальцев Александр Александрович

Официальные
оппоненты:

Хоров Евгений Михайлович,
доктор технических наук, доцент,
Институт проблем передачи информации имени
А.А. Харкевича РАН, лаборатория № 17,
заведующий лабораторией

Бурков Артём Андреевич,
кандидат технических наук,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, кафедра
инфокоммуникационных технологий и систем связи,
старший преподаватель

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород

Защита состоится 26 июня 2024 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 26 апреля 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В течение последних трех десятилетий беспроводная мобильная связь прошла путь от систем довольно громоздкой аналоговой телефонии до современной высокоразвитой общедоступной коммуникационной платформы. Внедрение новых поколений мобильных систем связи, начиная с 2G и заканчивая четвертым поколением 4G Long-Term Evolution (LTE), значительно изменило образ жизни человека благодаря высокой скорости и относительно малой задержке передачи данных.

ITU-R (МСЭ-Р, Сектор радиосвязи Международного Союза Электросвязи) в отчете 2017 года опубликовал список требований к системам мобильной связи 2020 года и последующих лет (International Mobile Telecommunications-2020, IMT-2020). Стандарт LTE (Long Term Evolution) систем мобильной связи четвертого поколения (4G) не способен выполнить предъявляемые к будущим системам мобильной связи более высокие требования к пропускной способности, времени задержки передачи данных и стабильности подключения к сети. По сравнению с 4G, системы связи пятого поколения (5G) стандарта New Radio (NR) должны обеспечивать гораздо более высокую скорость и сверхмалую задержку передачи данных за счет использования большего числа высокочастотных диапазонов и передовых сетевых технологий. По сравнению со стандартом LTE стандарт NR призван обеспечить в двадцать раз более высокую пиковую скорость передачи данных и в 10 раз меньшую временную задержку. В результате, в сетях связи пятого поколения будет реализована более надежная передача данных при более высокой плотности пользователей.

Для обеспечения высокоскоростной передачи данных в сетях 5G требуется расширение частотных диапазонов, что, однако, является основной причиной увеличенного потребления энергии как для пользовательского оборудования, так и для базовых станций в системах связи пятого поколения. Частотные диапазоны, используемые для систем связи нового стандарта 5G можно разделить на три категории: низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные. Низкочастотный диапазон расположен ниже 1 ГГц (аналогичный диапазону LTE). Среднечастотный диапазон, от 1 до 6 ГГц, в отличие от низкочастотного и высокочастотного диапазонов, обеспечивает баланс между охватом (величиной зоны покрытия) системы связи и ее пропускной способностью. Высокочастотный диапазон миллиметровых длин волн (mmWave) находится выше 24 ГГц и обеспечивает самые высокие скорости передачи данных и огромную пропускную способность всей системы в целом, благодаря большой полосе используемых частотных каналов, но имеет значительно меньшие

зоны покрытия из-за большего затухания сигналов на высокой несущей частоте при распространении в свободном пространстве.

Исходя из анализа требований ITU-R к системам 5G, тема диссертационной работы, посвященная разработке и исследованию методов обеспечения требований к энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной широкополосной связи пятого поколения, представляется актуальной.

Степень разработанности темы. Среди работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных системам беспроводной мобильной связи пятого поколения, можно отметить работы А. Е. Кучерявого, А. И. Парамонова, Р. В. Киричка, Е. А. Кучерявого, К. Е. Самуйлова, С. Н. Степанова, А. В. Рослякова, О. И. Шелухина, С. В. Поршнева, Р. Я. Пирмагомедова, А. А. Мальцева, А. В. Давыдова, Г. В. Морозова, M. Agiwal, E. Dahlman, V. Mondal и других авторов.

Работы отмеченных авторов внесли весомый вклад в разработку современных систем радиосвязи, в том числе сетей связи пятого поколения 5G. Однако до сих пор не были исследованы новые подходы и методы повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем беспроводной мобильной связи 5G. Как показано в таблице 1, требование к энергоэффективности систем 5G NR на два порядка выше, чем для систем связи 4G LTE. Также, как описано выше, использование более высокой несущей частоты требует разработки методов передачи, обеспечивающих уровень помехоустойчивости, как в системах 4G, при использовании имеющегося функционала систем связи 5G NR Release 15.

Объект и предмет диссертации. *Объектом* исследования являются системы мобильной широкополосной связи пятого поколения, а *предметом* – разработка методов снижения энергопотребления и вероятности пакетных ошибок в системах беспроводной мобильной связи пятого поколения.

Цель и задачи диссертации. *Целью* данной работы является разработка и исследование методов снижения энергопотребления и вероятности пакетных ошибок в системах беспроводной мобильной связи пятого поколения.

Приоритетными направлениями при достижении поставленной цели являются:

1. Повышение энергоэффективности пользовательского оборудования в системах связи 5G.
2. Снижение порога помехоустойчивости для систем связи 5G при передаче данных базовой станции от пользовательского оборудования на краю ячейки сотовой связи.

3. Компенсация нелинейных искажений передатчика пользовательского оборудования, работающего в режиме энергосбережения (в нелинейном режиме), путем дополнительной обработки сигнала на приемнике базовой станции.

Приоритетными задачами являются:

1. Разработка симулятора системы связи пятого поколения на системном уровне для версий стандарта NR Release 15-17 для исследования эффективности схем энергосбережения пользовательского оборудования, включающего кроме основных приемо-передающих элементов также все модели трафика в беспроводной системе связи, а также схемы контроля энергосбережения пользовательского оборудования из 4G LTE.

2. Разработка симулятора систем связи пятого поколения на физическом уровне для версий стандарта NR Release 15-17 для исследования помехоустойчивости и влияния нелинейных искажений передатчика пользовательского оборудования на производительность системы.

3. Исследование эффективности методов энергосбережения для пользовательского оборудования в системах связи 4G LTE и разработка новых методов энергосбережения для систем связи 5G NR.

4. Исследование помехоустойчивости различных типов передач в системах связи пятого поколения для идентификации канала связи с худшей помехоустойчивостью (т.е. с самым высоким уровнем порога помехоустойчивости), и разработка методов снижения порога помехоустойчивости для данного канала, что может в дальнейшем быть использовано в сетях 5G;

5. Исследование влияния нелинейных искажений сигналов на передачу данных в системах связи в среднечастотном и высокочастотном диапазоне миллиметровых длин волн и разработка новых эффективных методов компенсации нелинейных искажений сигналов, передаваемых пользовательским оборудованием, при приеме их на базовой станции.

Научная задача. Разработка методов мультислотовой передачи данных и адаптации схем прерывистого приема, повышающих энергоэффективность и помехоустойчивость систем мобильной широкополосной связи пятого поколения, что имеет важное практическое значение для разработки и широкого внедрения современных систем связи.

Научная новизна

1. Предложены методы адаптации схемы прерывистого приема для улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G, использующие специализированные сигналы «пробуждения» пользовательского

оборудования и перехода в «режим сна». Проведен анализ на системном уровне энергоэффективности предложенных алгоритмов для различных моделей трафика и ключевых сценариев использования систем беспроводной мобильной связи 5G.

2. Предложена новая схема мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи для снижения порога помехоустойчивости систем связи пятого поколения стандарта NR. Предложен специализированный алгоритм выбора бит для операции согласования скорости кодирования. Проведен анализ на физическом уровне выигрыша в снижении вероятности пакетных ошибок предложенного алгоритма и сравнение со стандартной схемой повторения передачи. Также, предложен специализированный шаблон межслотового переключения частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для улучшения качества оценки канала путем совместной межслотовой обработки и произведен анализ его эффективности в снижении порога помехоустойчивости систем связи 5G.

3. Разработан метод борьбы на стороне приемника с нелинейными искажениями, вызванными на передатчике. Проведен анализ эффективности предложенного алгоритма на примере борьбы с искажениями в усилителе мощности и дисбалансом синфазной и квадратурной компонент в модуляторе передатчика.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит, прежде всего, в исследовании моделей потребления энергии пользовательским оборудованием, моделей трафика данных в системах беспроводной мобильной связи, а также в исследовании и разработке методов и алгоритмов повышения энергоэффективности и помехоустойчивости (снижения вероятности пакетных ошибок) систем мобильной связи пятого поколения. Самостоятельную теоретическую значимость имеет метод компенсации нелинейных искажений, возникающих на передатчике, на стороне приёмника.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании методов улучшения схемы прерывистого приема и разработке нового типа мультислотовой передачи данных в восходящем канале связи систем связи пятого поколения, которые используются в системах мобильной связи 5G, начиная со стандартов NR Release 16-17, а также могут быть использованы в дальнейшем как в системах сотовой связи пятого поколения, так и при разработке алгоритмов для обеспечения высокой энергоэффективности и помехоустойчивости систем беспроводной мобильной связи шестого поколения. Эффективность представленных методов и алгоритмов подтверждается результатами компьютерного имитационного моделирования на системном и физическом уровнях, представленными в данной диссертационной работе

для моделей и сценариев использования систем связи, утвержденными Международным союзом электросвязи ИТУ и международным консорциумом 3GPP, отвечающим за разработку стандартов беспроводной мобильной связи.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка технологий гибридного сканирования луча для многоэлементных антенн с высоким коэффициентом усиления в диапазоне частот 5-6 ГГц» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, теории информации, высшей алгебры, а также методы математического и компьютерного имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Методы адаптации схемы прерывистого приема для улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G, использующие специализированные сигналы пробуждения пользовательского оборудования и перехода в режим сна.

2. Схема мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи для снижения порога помехоустойчивости систем связи пятого поколения 5G стандарта NR.

а. Специализированный алгоритм выбора бит для операции согласования скорости кодирования.

б. Специализированный шаблон межсотового переключения частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для совместной оценки канала.

3. Метод борьбы на стороне приемника с искажениями сигналов, созданными в усилителе мощности передатчика (нелинейные искажения) и в модуляторе передатчика (дисбаланс синфазной и квадратурной компонент).

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждаются их сравнением с результатами, полученными с помощью математического моделирования, с опубликованными результатами для частных случаев, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям теории статистической радиофизики и теории информации.

Публикации и апробация результатов. Всего по теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 7 патентов, две работы опубликованы в сборнике докладов конференций, рецензируемых в международных базах данных SCOPUS и Web of Science, две работы опубликованы в сборниках докладов конференций, включенных в РИНЦ.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций: п. 2 «Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций»; п. 7 «Исследование проблем построения, планирования и проектирования сетей пятого и последующих поколений как основы создания эффективной цифровой экономики и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей»; п. 18 «Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования».

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационной работы получены лично автором. В совместных публикациях автор принимал непосредственное участие в постановке и решении задачи, и в обсуждении результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 126 страниц. Работа содержит 53 рисунка, 23 таблицы. Список литературы содержит 60 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и описана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая ценность результатов, приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме выполненного исследования.

В первой главе проведен аналитический обзор, посвященный системам мобильной широкополосной связи пятого поколения. В частности, рассмотрены сценарии использования систем связи 5G, разработанные Международным союзом

электросвязи (МСЭ, ITU) в рамках разработанной концепции систем связи IMT-2020/5G. Также рассмотрены варианты развертывания систем связи 5G.

Первоначальное внедрение инфраструктуры сотовой связи 5G NR сосредоточено на улучшенной мобильной широкополосной связи (eMBB) для обеспечения повышенной пропускной способности передачи данных и надежности соединения в двух новых диапазонах радиочастот: среднечастотном (от 1 до 6 ГГц) и высокочастотном (выше 24 ГГц). Сети связи 5G NR в первой волне развертывания классифицируются как неавтономные (Non-Standalone, NSA), что означает, что сети 5G поддерживаются имеющейся инфраструктурой сетей 4G. В таких Non-Standalone системах пользовательские устройства с поддержкой сетей пятого поколения работают в полосе частот 5G для повышения пропускной способности передачи данных, но по-прежнему используют 4G для задач, не связанных с передачей данных, например, таких как связь с вышками сотовой связи и серверами.

При первоначальном развертывании систем связи 5G был выявлен ряд проблем:

1. Высокое энергопотребление из-за увеличения вычислительной нагрузки для обеспечения повышенной пропускной способности передачи данных и надежности соединения.

2. Низкий уровень мощности принятого сигнала базовой станцией от пользовательского оборудования при работе в сетях связи 5G по причине увеличения рабочей частоты передаваемого сигнала при переходе из среднечастотного диапазона систем 4G (до 4 ГГц) в среднечастотный диапазон систем 5G (до 6 ГГц).

3. Компенсация нелинейных искажений сигнала, возникающих на передатчике пользовательского оборудования. При увеличении полосы частот, используемой для передачи данных в сетях 5G, для поддержания прежнего уровня энергозатрат на передачу сигнала, усилителю мощности (power amplifier, PA) на передатчике пользовательского оборудования приходится переходить в более нелинейный режим, что, однако, влечет к дополнительным энергозатратам пользовательского оборудования на компенсацию нелинейных искажений.

Далее в главе рассмотрены методы энергосбережения пользовательского оборудования (user equipment, UE) и снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 5G, а также определены возможные направления разработки новых методов или усовершенствования используемых методов.

Вторая глава диссертации посвящена улучшению методов энергосбережения пользовательского оборудования для мобильных систем связи 5G NR. Представлены схемы энергосбережения для систем связи 5G NR, основанные на адаптации схемы прерывистого приема (DRX) за счет использования специализированных сигналов

пробуждения UE и перехода UE в режим сна. Также были рассмотрены сценария моделирования и модели трафика данных в системах беспроводной мобильной связи. Эффективность предложенных алгоритмов энергосбережения UE в системах связи 5G была изучена путем компьютерного моделирования беспроводных сетей связи на системном уровне.

Приводится описание системной модели системы мобильной связи 5G. Представлены сценарии моделирования беспроводных мобильных систем связи на системном уровне и модели трафика мобильных систем связи.

Далее рассмотрены методы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования для 5G NR, в том числе предложены схемы улучшения энергосбережения для систем связи 5G NR, основанные на адаптации схемы прерывистого приема за счет использования специализированных сигналов пробуждения пользовательского оборудования и перехода пользовательского оборудования в режим сна.

На рисунке 1 показан пример работы схемы прерывистого приема при использовании сигнала пробуждения UE. На данном примере за счет передачи wake-up сигнала сокращение энергопотребления UE произошло за счет пропуска первого и третьего DRX циклов.

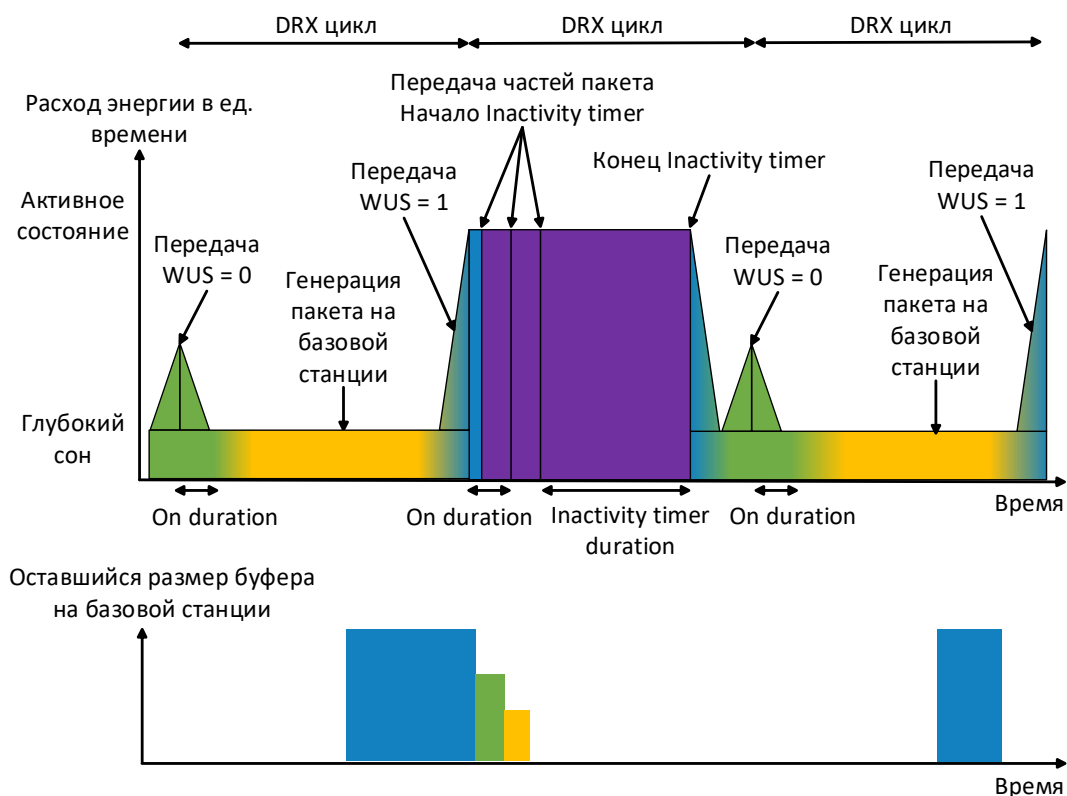


Рисунок 1 – Распределение расхода энергии по времени при использовании сигнала пробуждения UE

Сигнал пробуждения (wake-up signal, WUS), предложенный в данной работе и в патенте US20220182938, передается базовой станцией перед циклом DRX, сообщая о наличии доступного пакета для определенного пользовательского оборудования, помогает UE пропускать On duration в DRX циклах, когда базовая станция (БС) не имеет пакета для этого UE. Аналогично, сигнал пробуждения помогает избежать лишнего энергопотребления при переходах из спящего режима в активное состояние перед On duration и переходах из активного состояния в спящий режим после On duration.

Предложенный в патенте US20210176762 и в настоящей работе сигнал перехода UE в режим сна (go-to-sleep) передается от базовой станции пользователю, сигнализируя UE перейти в режим сна на определенный сконфигурированный промежуток времени. Он передаётся на физическом уровне, что позволяет UE принять и обработать его с минимально возможной задержкой, т.е. за промежуток времени меньше или порядка 1мс. Другим преимуществом go-to-sleep (GTS) сигнала является то, что он сигнализирует перейти в сон лишь на определенное время, которое можно сконфигурировать в несколько раз меньше таймера Inactivity. Таким образом, в течение таймера Inactivity UE может просыпаться несколько раз, пока не закончится таймер (см. рисунок 2), или пока не появится новый пакет на BS (см. рисунок 3), что даёт возможность быстро начать приём нового пакета в случае его генерации на базовой станции в течение таймера Inactivity, при этом сэкономив большое количество энергии. В дополнение к перечисленным преимуществам, минимально возможная задержка обработки go-to-sleep сигнала позволяет использовать его в течение таймера On duration, когда на BS также нет пакетов для данного UE.

На рисунке 2 представлен график расхода энергии пользователем при использовании предложенного нового go-to-sleep сигнала при отсутствии пакета на базовой станции в течении всей длительности таймера Inactivity. Рисунок 3 иллюстрирует пример графика расхода энергии пользователем для случая с генерацией пакета на BS во время таймера Inactivity.

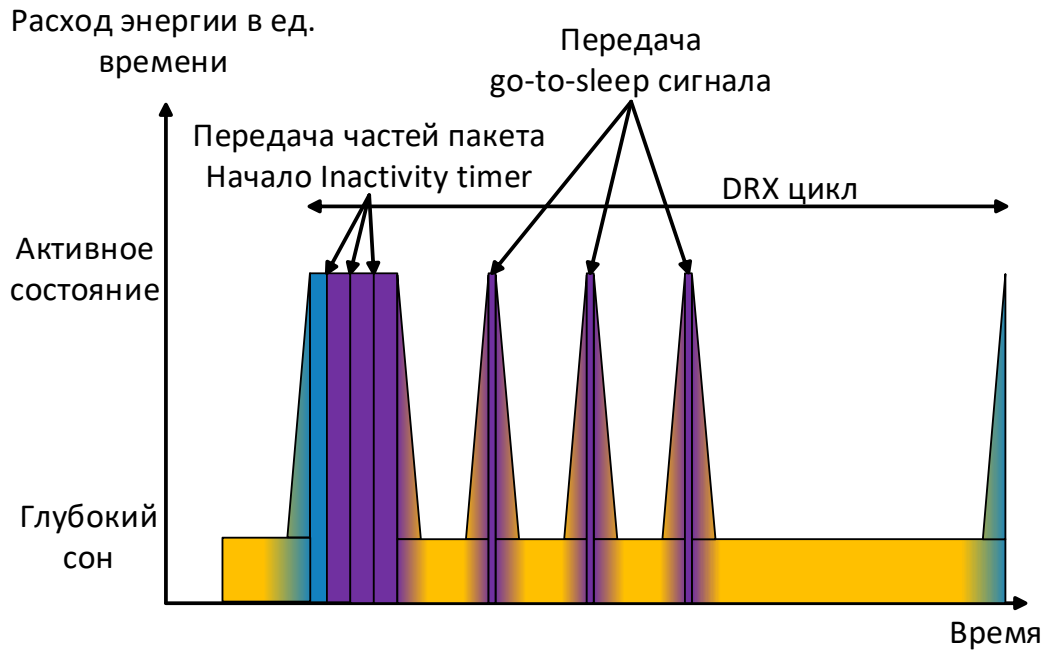


Рисунок 2 – Пример работы сигнала перехода в режим сна в случае отсутствия генерации нового пакета в течение таймера Inactivity

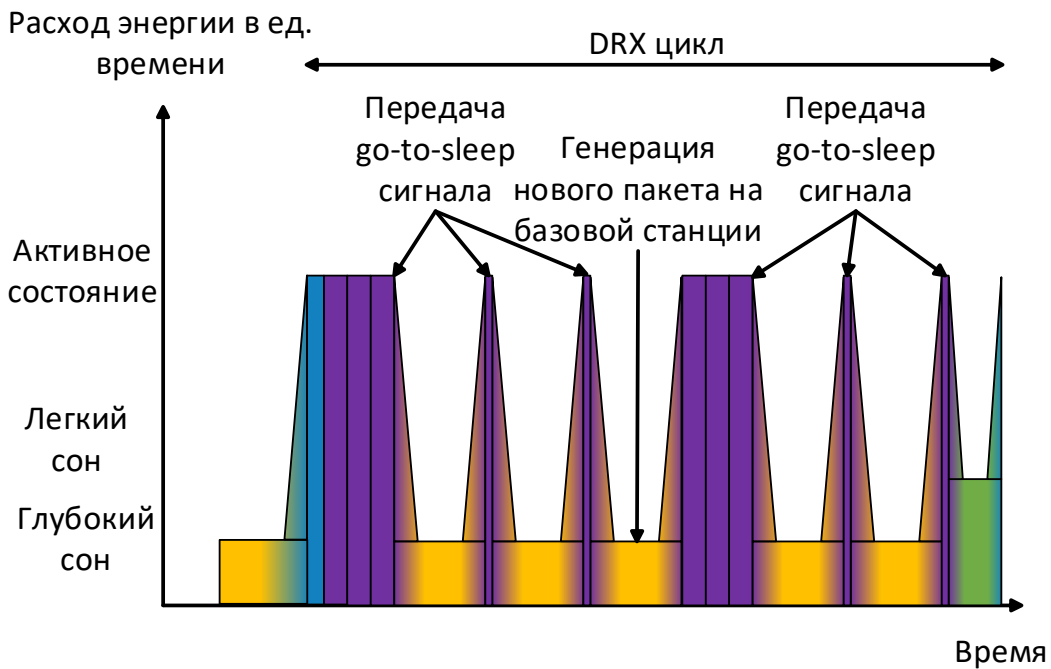


Рисунок 3 – Пример работы сигнала перехода в режим сна в случае генерации нового пакета в течение таймера Inactivity

Приводятся результаты компьютерного моделирования на системном уровне эффективности предложенных схем энергосбережения UE для систем беспроводной связи 5G NR. Моделирование нисходящего канала связи (downlink, DL) проводилось для Urban Macro сценария для частотного диапазона 1 (frequency region 1, FR1). Были

выбраны стандартные параметры для данного сценария, такие как: несущая частота 4 ГГц, ширина полосы частот 100 МГц, расстояние между поднесущими 30 кГц, расстояние между BS равное 200 м, т.е. стандартные параметры для подтипа данного сценария с плотным расположением BS (Dense Urban Macro).

Анализ результатов моделирования показал, что предложенные способы адаптации схемы прерывистого приема к поступающему трафику дают значительный выигрыш в энергосбережении до 70% для моделей трафика обмена мгновенными сообщениями и просмотра веб-страниц, обеспечивающих низкую загрузку частотно-временных ресурсов системы связи. Применение сигнала перехода пользовательского оборудования в режим сна приводит к стабильному снижению среднего потребления энергии мобильным устройством за один слот времени с незначительным уменьшением выигрыша в энергоэффективности пользовательского оборудования до 60% и 50% для случаев со средней и высокой загрузкой частотно-временных ресурсов, соответственно.

В третьей главе была рассмотрена задача снижения порога помехоустойчивости систем связи 5G NR. Представлены методы для уменьшения вероятности блоковой ошибки пользовательского оборудования на границе ячейки систем сотовой связи 5G, т.е. для сценария плохого состояния канала.

Представлены методы снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 5G. Описана предложенная в настоящей работе, а также в патентах CN116601898 и US20210298048, схема перестройки частоты между слотами в 5G, позволяющая использовать совместную оценку канала с межслотовым объединением опорных сигналов демодуляции. В том числе был представлен, описанный также в патенте CN116830508, новый тип мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи систем 5G, имеющий ряд отличий и улучшений относительно схемы повторения передачи.

Новый подход к передаче данных по каналу PUSCH в плохих условиях канала реализуется путем мультислотовой передачи. Эта схема введена в стандарт сетей связи 5G, начиная с NR Release-17, и основана на охватывании передаваемым блоком данных нескольких слотов (transport block spanning over multiple slots, TBoMS) для обеспечения достаточно низких скорости кодирования и модуляции, позволяя при этом более эффективно использовать ограниченную мощность передатчика UE.

При использовании данной схемы частотно-временные ресурсы всех слотов, сконфигурированных для передачи TBoMS, используются вместе для вычисления размера передаваемого блока данных (transport block size, TBS) на основе скорости кодирования и модуляции, необходимых для успешной передачи пакетов при текущем

состоянии восходящего канала системы связи. Таким образом, весь пакет кодируется для совместной ресурсной аллокации всех слотов, сконфигурированных для передачи TBoMS. Затем в каждом слоте, выделенном для передачи TBoMS, передается только соответствующая часть кодовой последовательности. Декодирование полной кодовой последовательности происходит только после получения всех слотов. Новый подход, как и схема повторения передачи, позволяет заранее гарантировать определенное время передачи пакетов данных путем конфигурирования необходимого количества слотов, выделенных для передачи TBoMS, и за счет отсутствия задержек между передачами.

Главным отличием схемы TBoMS является измененная схема выбора бит (bit selection) из циклического буфера LDPC кодов для операции согласования скорости кодирования (rate matching). В работе приведен анализ матриц LDPC кодов, из которого было получено, что оптимальным для кодовой последовательности является прямой порядок передачи бит: систематические биты, проверочные биты первой группы, проверочные биты второй группы.

По полученному принципу очередности передачи бит кодовой последовательности LDPC кодов была сформирована процедура выбора бит для операции согласования скорости кодирования передачи по схеме TBoMS.

Индекс s_n начального бита в циклическом буфере для n -го слота, сконфигурированного для TBoMS передачи, вычисляется как:

$$s_n = \begin{cases} k_0, & n = 0 \\ (s_{n-1} + H + \tau_{n-1}) \bmod N_{cb}, & n = 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (1)$$

где k_0 – индекс начального бита для версии избыточности, сконфигурированной для TBoMS передачи; N_{cb} – длина циклического буфера; H – общее количество кодированных битов, доступных для передачи в слоте, выделенном для TBoMS; τ_{n-1} – количество битов заполнения, пропущенных при выборе бит для предыдущего слота, если таковые имеются; N – количество слотов, сконфигурированных для TBoMS передачи.

Процедура вычисления начального бита в циклическом буфере для n -го слота, сконфигурированного для TBoMS передачи, изображена на рисунке 4.

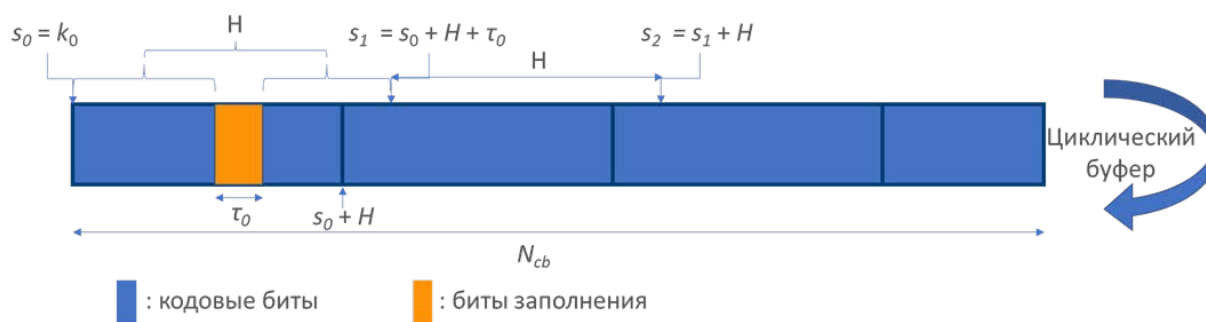


Рисунок 4 – Процедура вычисления начального бита в циклическом буфере для n -го слота TBoMS передачи

Приводится описание моделей канала связи для моделирования беспроводных мобильных систем связи на физическом уровне, таких как

1. Группа моделей канала связи Clustered Delay Line (CDL).
2. Группа упрощенных моделей канала связи Tapped Delay Line (TDL).

Далее в диссертации приводятся результаты компьютерного моделирования симуляторе физического уровня для изучения эффективности использования описанных схем улучшения покрытия систем беспроводной связи 5G NR. Моделирование восходящего канала связи проводилось с использованием TDL-C модели канала связи в частотном диапазоне 1 для загородного и городского сценариев с несущими частотами 700 МГц и 4 ГГц, соответственно. Для имитации худшего сценария состояния канала связи использовались минимальные размеры ресурсных аллокаций, т.е. один ресурсный блок для схемы TBoMS и четыре ресурсных блока для однослотовой передачи по каналу PUSCH.

Анализ результатов показал, что использование улучшенной схемы перестройки частоты между слотами дает дополнительное снижение вероятности пакетных ошибок примерно на 0,5 дБ за счет использования объединения символов DM-RS для совместной оценки канала. Также показано, что выигрыш в снижении порога помехоустойчивости данной схемы по сравнению со стандартной схемой повторения передачи за счет использования улучшенной схемы выбора бит для операции согласования скорости кодирования может достигать примерно 1 дБ.

Четвертая глава посвящена задаче компенсации нелинейных искажений, возникающих на стороне передатчика. Предложен и исследован новый метод компенсации нелинейных искажений, основанный на прямом статистическом анализе принятых символов данных для оценки искажения и использования этих оценок в процессе демодуляции и декодирования.

Приводится описание системной модели. На примере обобщенной структурной схемы передатчика с квадратурным модулятором, представленном на рисунке 5, были описаны модели искажений, таких как нелинейность усилителя мощности передатчика (модель Rapp) и дисбаланс I/Q компонент сигнала (модель из документов по методологии оценки стандартов IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay).

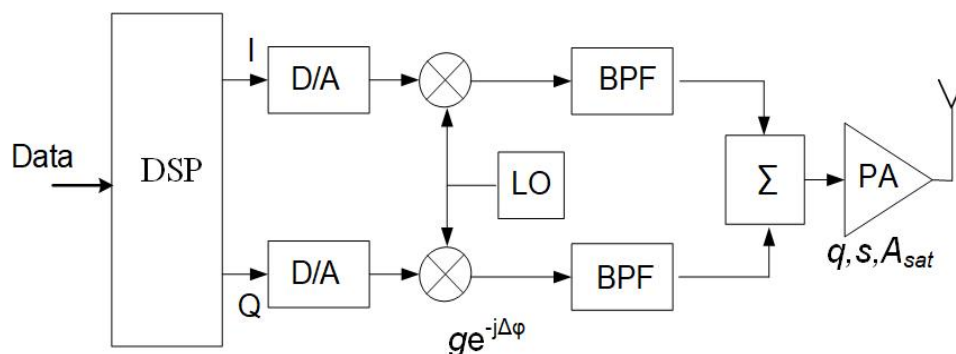


Рисунок 5 – Обобщенная структурная схема передатчика

Далее в диссертации предложен общий подход к компенсации искажений передатчика на стороне приемника. Предлагаемый подход к компенсации искажений, возникающих на передатчике, на стороне приёмника включает в себя две основные операции.

Во-первых, параметры суммарных линейных (I/Q дисбаланс) и нелинейных (в усилителе мощности) искажений сигнала, вызванных неидеальной работой блоков передатчика, оцениваются путем статистического анализа распределений комплексных амплитуд сигнала. Во-вторых, «мягкие» метрики (LLR, Log-Likelihood Ratio), используемые в декодере (LDPC), вычисляются при демодуляции сигналов с учетом корректировки опорного модуляционного созвездия. Статистическая оценка искажений из-за дисбаланса I/Q компонент и нелинейности усилителя мощности проводилась на основе построения диаграмм рассеяния полученных комплексных амплитуд QAM сигналов. Пошаговое описание этапов обработки сигналов в радиоприемнике для компенсации искажений в радиопередатчике приведено ниже:

1. Используя априорное знание структуры модуляционного созвездия (например, 16QAM созвездия), в комплексной области принимаемого сигнала создается однородная двумерная сетка из ячеек достаточно малого размера. Путем тестирования предложенного алгоритма выявлено, что размер элементарных ячеек должен составлять не более 0.05 от максимальной амплитуды сигнала.

2. Для каждой ячейки созданной двумерной сетки вычисляется количество символов принятого модулированного сигнала, попадающих в область этой ячейки.

3. Производится обработка полученного двумерного массива счетчика символов (гистограмм) принятого модулированного сигнала, попадающих в области ячеек, путем двумерной фильтрации с гауссовским ядром. Данная обработка аналогична двумерной обработке изображений для борьбы с зашумленностью или после его сжатия. После двумерной фильтрации исходных данных производится поиск локальных максимумов, которые затем используются как новые точки опорного модуляционного созвездия. При практической реализации двумерной фильтрации радиус окна для гауссовского фильтра подбирался путем нескольких последовательных циклов обработки по критерию совпадения количества полученных максимумов с количеством точек в модуляционном созвездии принимаемого сигнала (например, до 16 точек для 16QAM модуляции).

4. Координаты точек, соответствующих локальным максимумам полученного двумерного массива, используются в качестве опорных в процессе демодуляции принятых сигналов при вычислении евклидовых расстояний в алгоритмах демодуляции сигналов для более точного вычисления «мягких» LLR метрик (для каждого принятого бита), которые подаются на LDPC декодер приемника.

Эффективность предложенного адаптивного алгоритма демодуляции и декодирования с компенсацией в радиоприемнике линейных и нелинейных искажений сигналов передатчиком была проверена путем обработки нескольких серий экспериментальных измерений характеристик созданного прототипа приемопередающего оборудования.

Приводится анализ измерений вероятностей блоковых ошибок в 11 сериях экспериментов при использовании адаптивного алгоритма компенсации и без него. Сравнение вероятностей блоковых ошибок показало, что применение предложенного адаптивного алгоритма демодуляции и декодирования сигналов в радиоприемнике при одинаковых условиях передачи позволило снизить вероятность пакетных ошибок приблизительно в два раза.

Далее в диссертации приводятся результаты компьютерного моделирования, проведенного с использованием симулятора физического уровня с поддержкой матриц LDPC кодов из стандарта Wi-Fi IEEE 802.11ad, а также модуляции сигнальной волны SC-FDE.

Рисунки 6, 7, 8 иллюстрируют производительность разработанного алгоритма путем сравнения кривых вероятности блоковой ошибки (Block Error Rate, BLER) с применением и без применения схемы компенсации на стороне приемника для модуляции 16QAM и кодовой скорости $R = 0,75$, для различных значений фазового сдвига $\Delta\varphi$ между I/Q компонентами и различных значений уровней насыщения Sat на

усилителе мощности. Красные кривые соответствуют вероятности блоковой ошибки в случае без использования схемы компенсации; зеленые кривые соответствуют вероятности блоковой ошибки в случае с применением схемы компенсации.

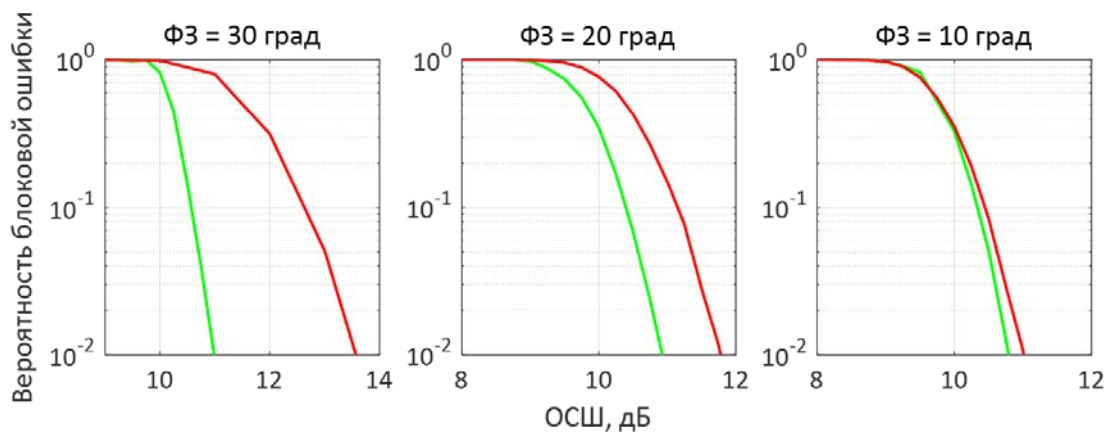


Рисунок 6 – Эффективность компенсационного алгоритма для $\Delta\varphi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$

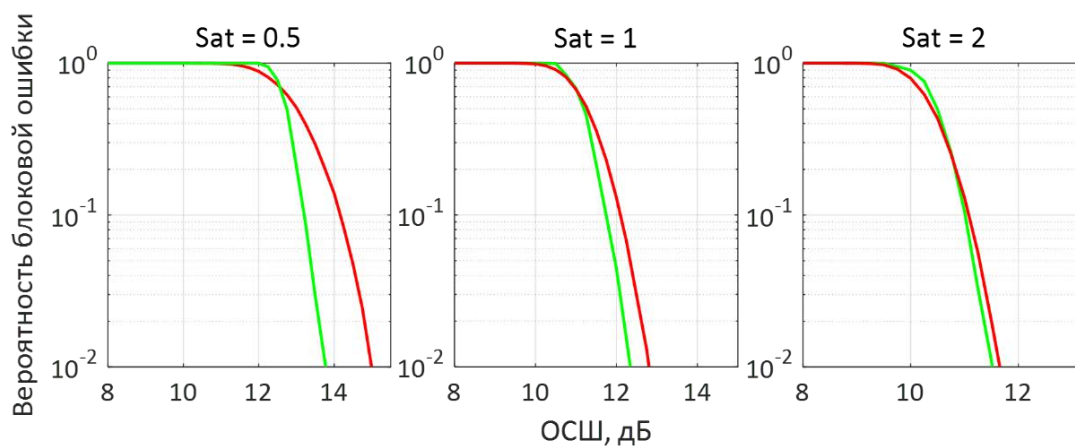


Рисунок 7 – Эффективность компенсационного алгоритма для Sat = 0.5, 1 и 2

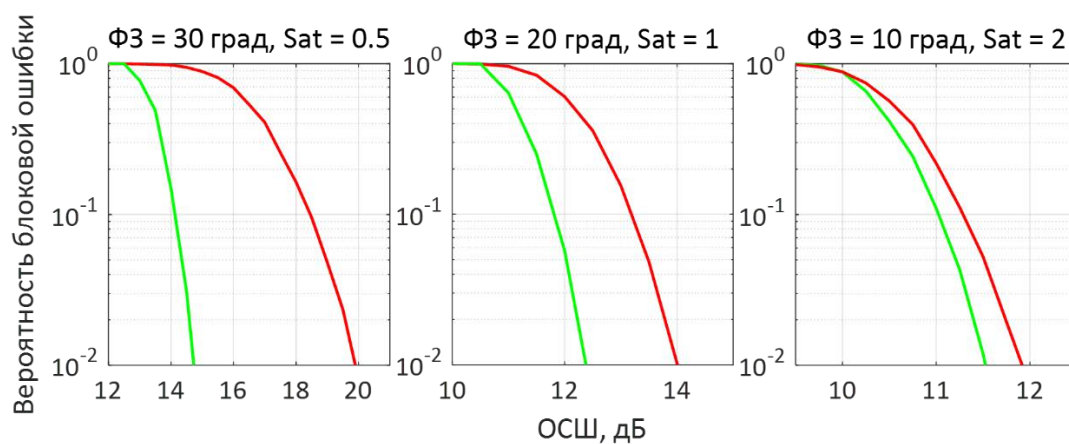


Рисунок 8 – Эффективность компенсационного алгоритма для комбинаций $\Delta\varphi = 30^\circ, \text{Sat} = 0,5$; $\Delta\varphi = 20^\circ, \text{Sat} = 1$; $\Delta\varphi = 10^\circ, \text{Sat} = 2$

Результаты моделирования показали, что разработанный самообучающийся алгоритм борьбы с нелинейными искажениями демонстрирует высокий уровень компенсации в случае дисбаланса I/Q компонент и нуждается в дальнейшем улучшении эффективности для случая, когда на стороне передатчика также присутствует нелинейность усилителя мощности.

В заключении изложены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие научные результаты:

1. Предложены методы адаптации схемы прерывистого приема для улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G, использующие специализированные сигналы пробуждения пользовательского оборудования и перехода в режим сна.

2. Эффективность предложенных алгоритмов была детально изучена путем имитационного моделирования сетей беспроводной связи стандарта NR Release-15 на системном уровне. Анализ результатов моделирования показал, что предложенные способы адаптации схемы прерывистого приема к поступающему трафику дают значительный выигрыш в энергосбережении до 70% для моделей трафика обмена мгновенными сообщениями и просмотра веб-страниц, обеспечивающих низкую загрузку частотно-временных ресурсов системы связи.

3. Анализ результатов моделирования показал, что применение сигнала перехода пользовательского оборудования в режим сна приводит к стабильному снижению среднего потребления энергии мобильным устройством за один слот времени с незначительным уменьшением выигрыша в энергоэффективности пользовательского оборудования до 60% и 50% для случаев со средней и высокой загрузкой частотно-временных ресурсов, соответственно.

4. Предложенные методы энергосбережения пользовательского оборудования были рекомендованы к использованию в системах связи 5G и внедрены в стандарт систем связи пятого поколения, начиная с релизов NR Release-16 (сигнал пробуждения пользовательского оборудования) и NR Release-17 (сигнал перевода пользовательского оборудования в режим сна).

5. Предложена новая схема мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи для снижения порога помехоустойчивости систем связи пятого поколения стандарта NR.

6. Предложен специализированный алгоритм выбора бит для операции согласования скорости кодирования при использовании нового типа мультислотовой передачи данных.

7. Предложен специализированный шаблон межслотового переключения частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для улучшения оценки канала за счет совместной межслотовой обработки.

8. Произведен анализ эффективности предложенных методов снижения порога помехоустойчивости систем связи 5G и произведено сравнение со стандартной схемой повторения передачи. Анализ на физическом уровне схемы мультислотовой передачи по восходящему каналу связи показывает, что использование улучшенной схемы перестройки частоты между слотами дает дополнительное снижение порога помехоустойчивости примерно на 0.5 дБ за счет использования объединения символов DM-RS для совместной оценки канала. Также было показано, что выигрыш в снижении порога помехоустойчивости данной схемы по сравнению со стандартной схемой повторения передачи за счет использования улучшенной схемы выбора бит для операции согласования скорости кодирования может достигать примерно 1 дБ.

9. Схема мультислотовой передачи по восходящему каналу связи была рекомендована к использованию в системах связи 5G и внедрена в стандарт систем связи пятого поколения, начиная с релиза NR Release-17.

10. Разработан метод борьбы на стороне приемника с нелинейными искажениями, вызванными на передатчике.

11. Проведен анализ эффективности предложенного алгоритма на примере борьбы с искажениями в усилителе мощности и дисбалансом синфазной и квадратурной компонент в модуляторе передатчика. Результаты моделирования показали, что разработанный самообучающийся алгоритм борьбы с нелинейными искажениями демонстрирует очень хороший уровень компенсации в случае дисбаланса I/Q компонент и нуждается в дальнейшем улучшении производительности для случая, когда на стороне передатчика также присутствует нелинейность усилителя мощности.

12. По сравнению с известными схемами предварительного искажения передаваемого сигнала для компенсации нелинейных искажений передатчика, разработанный самообучающийся алгоритм намного менее сложен и поэтому может быть использован для применения в сетях Интернета вещей в системах связи 5G, а также в процессе разработки устройств следующих поколений систем беспроводной связи.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в рецензируемых научных изданиях,
включенных в перечень ВАК**

1. Ермолаев, Г.А. Прототип приемо-передающего оборудования скоростной передачи данных в частотном диапазоне 57–64 ГГц / О.В. Болховская, Г.А. Ермолаев, С.Н. Трушков, А.А. Мальцев // Труды учебных заведений связи. – 2023 – Т. 9 – № 2 – С. 23–39 – DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-23-39.

2. Ермолаев, Г.А. Анализ энергоэффективности схемы прерывистого приема в системах связи 5G NR / Г.А. Ермолаев, О.В. Болховская, А.А. Мальцев // Труды учебных заведений связи 2023. – Т. 9 – № 5 – С. 16-24 – DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-16-24.

3. Ермолаев, Г.А. Алгоритмы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G NR. Часть I / Г.А. Ермолаев // Электросвязь. – 2023 – № 11 – С. 70–74.

4. Ермолаев, Г.А. Алгоритмы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G NR. Часть II / Г.А. Ермолаев // Электросвязь. – 2024 – № 1 – С. 37–42.

Результаты интеллектуальной деятельности

5. Patent US20220182938. United States of America. H04W52/0209. Physical Downlink Control Channel Based Wake Up Signal / Ye Q., He H., Islam T., Ermolaev G. – filed 27.03.20; publ. 09.06.22.

6. Patent US20210176762. United States of America. H04W72/0493. Downlink Control Channel Signaling for Improved Power Consumption at a User Equipment (UE) / Islam T., He H., Ermolaev G. – filed 07.11.19; publ. 10.06.21.

7. Patent US20220124622. United States of America. System and Method of Adaptation of Reference Signal (RS) Monitoring for User Equipment (UE) Power Saving / Islam T., He H., Ye Q., Ermolaev G. – filed 17.02.2020; publ. 21.04.2022.

8. Patent US20220210736. United States of America. Cross-slot Scheduling Power Saving Techniques / Islam T., He H., Ye Q., Ermolaev G. – filed 02.04.2020; publ. 30.06.2022.

9. Patent CN116601898. People's Republic of China. Enhanced Inter-Slot Frequency Hopping for Uplink Coverage in 5G Systems / Xiong G., Sosnin S., Ermolaev G., Zhu J. – filed 11.01.2022; publ. 15.08.2023.

10. Patent US20210298048. United States of America. Coverage Enhancement for Physical Uplink Control Channel Transmissions in New Radio / Xiong G., Sosnin S., Ermolaev G., Zhu J., Sengupta A., Davydov A. – filed 16.04.2021; publ. 23.09.2021.

11. Patent CN116830508. People's Republic of China. Time-Domain Resource Allocation for Transport Block Over Multiple Slot (TBoMS) Transmissions / Xiong G., Sosnin S., Ermolaev G., Zhu J., Chatterjee D. – filed 22.03.2022; publ. 29.09.2023.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

12. Ермолаев, Г.А. Методы улучшения покрытия для восходящего канала передачи данных в системах беспроводной мобильной связи пятого поколения / Г.А. Ермолаев, А.В. Давыдов, А.А. Мальцев // Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 75-летию радиофизического факультета. – 2020 – С. 306-309.

13. Ермолаев, Г.А. Статистический метод адаптивной компенсации нелинейных искажений на стороне приёмника / Г.А. Ермолаев, О.В. Болховская, А.А. Мальцев // Труды XXV научной конференции по радиофизике. – 2021 – С. 332-335.

14. Ermolaev, G. Advanced Approach for TX Impairments Compensation Based on Signal Statistical Analysis at the RX Side / G. Ermolaev, O. Bolkhovskaya, A. Maltsev // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. – 2021 – pp. 1-5 – DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470687.

15. Ermolaev, G. Multi-slot Transmission with Effective Frequency Hopping and DMRS Bundling for 5G NR Coverage Enhancement / G. Ermolaev, O. Bolkhovskaya, A. Maltsev // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2022 – pp. 1-4 – DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803376.