

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Нижегород – 2024

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Системы мобильной широкополосной связи пятого поколения	15
1.1. Сценарии использования систем связи 5G	15
1.2. Неавтономные сети 5G.....	17
1.3. Энергоэффективность пользовательского оборудования в 5G.....	19
1.4. Энергосбережение пользовательского оборудования в мобильных системах связи 4G LTE.....	21
1.4.1. Схема прерывистого приема	21
1.4.2. Проблемные места схемы прерывистого приема.....	23
1.5. Порог помехоустойчивости систем связи 5G	25
1.6. Методы снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 4G LTE	27
1.6.1. Переключение частоты	27
1.6.2. Повторение передачи	31
1.7. Нелинейные искажения на передатчике пользовательского оборудования в 5G	32
1.8. Выводы.....	35
Глава 2 Улучшение методов энергосбережения пользовательского оборудования для мобильных систем связи 5G NR.....	37
2.1. Описание системной модели	37
2.1.1. Сценарии моделирования беспроводных мобильных систем связи на системном уровне.....	38
2.1.2. Модели трафика мобильных систем связи	41
2.2. Методы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования для 5G	49

2.2.1.	Сигнал пробуждения пользовательского оборудования	49
2.2.2.	Сигнал перехода пользовательского оборудования в режим сна..	51
2.2.3.	Межслотовое планирование передачи и адаптация конфигурации антенной решетки	55
2.3.	Результаты компьютерного моделирования	56
2.3.1.	Анализ эффективности схемы прерывистого приема.....	61
2.3.2.	Анализ эффективности сигнала перехода пользовательского оборудования в режим сна	63
2.3.3.	Анализ эффективности сигнала пробуждения пользовательского оборудования.....	74
2.3.4.	Анализ эффективности межслотового планирования передачи и адаптации конфигурации антенной решетки.....	78
2.4.	Выводы.....	81
Глава 3	Снижение порога помехоустойчивости систем связи 5G NR.....	83
3.1.	Методы снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 5G.....	83
3.1.1.	Улучшение схемы повторения передачи	83
3.1.2.	Межслотовая совместная оценка канала с объединением опорных сигналов демодуляции.....	84
3.1.3.	Межслотовое переключение частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для совместной оценки канала	84
3.1.4.	Мультислотовая передача данных по восходящему каналу связи	86
3.2.	3GPP модели канала связи для моделирования беспроводных мобильных систем связи на физическом уровне	94
3.3.	Результаты компьютерного моделирования	96

3.4. Выводы.....	103
Глава 4 Метод адаптации к нелинейным искажениям передаваемых сигналов в системах связи пятого поколения.....	105
4.1. Описание системной модели	105
4.2. Общий подход к компенсации искажений передатчика на стороне приемника	109
4.3. Результаты компьютерного моделирования	112
4.4. Выводы.....	115
Заключение	116
Список литературы	119
Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертации.....	126

Введение

Актуальность темы исследования

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 [1] 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 [1]. 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 [2, 3]. В результате, в сетях связи пятого поколения будет реализована более надежная передача данных при более высокой плотности пользователей.

Сравнение основных характеристик систем связи 4G и 5G приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных характеристик систем связи 4G и 5G

Поколение	4G	5G
Пиковая скорость передачи	1 Гб/с в нисходящем канале связи	20 Гб/с в нисходящем канале связи
Ожидаемая пользователем скорость передачи	10 Мб/с	100 Мб/с
Эффективность использования спектра	-	в 3 раза выше, чем в 4G
Пропускная способность на единицу площади	0,1 Мб/с/м ²	10 Мб/с/м ²
Задержка передачи пакета	10 мс	1 мс
Плотность соединений	100000/км ²	1000000/км ²
Энергоэффективность сети	-	в 100 раз выше, чем в 4G
Допускаемая мобильность пользователя	350 км/ч	500 км/ч
Ширина полосы частот	До 20 МГц	До 1 ГГц

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 ГГц 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.

На рисунке 1 приведена диаграмма, иллюстрирующая различия между частотными диапазонами систем связи 5G с точки зрения пропускной способности и величины зоны покрытия. Исходя из соотношения между данными характеристиками частотных диапазонов, высокочастотный диапазон целесообразно использовать для густонаселенных городских районов, среднечастотный – для средних по плотности населения районов, а низкочастотный – для общенационального покрытия.

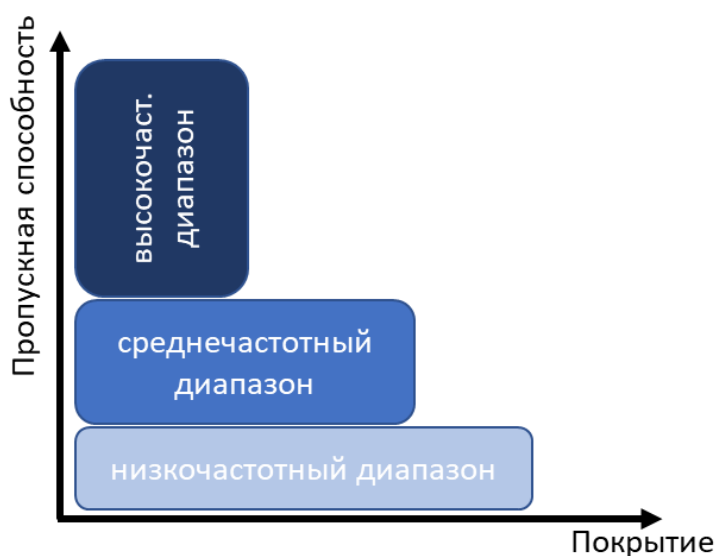


Рисунок 1 – Характеристики частотных диапазонов, используемых в 5G

Исходя из анализа требований ITU-R к системам 5G, представленных в таблице 1, 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 исследования

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, B. 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 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.

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» (Приложение А) 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.
 - Специализированный алгоритм выбора бит для операции согласования скорости кодирования.
 - Специализированный шаблон межслотового 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 написано восемь работ и получено семь патентов. Из них четыре статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 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.

Глава 1 Системы мобильной широкополосной связи пятого поколения

1.1. Сценарии использования систем связи 5G

По сравнению со стандартом связи LTE, который в основном ориентирован на предоставление таких услуг, как голосовая связь (Voice over LTE, VoLTE) или мобильная широкополосная связь (Mobile Broadband, MBW), стандарт 5G NR предоставит не только более продвинутые варианты существующих технологий, которые смогут обеспечить гораздо более высокие скорости передачи данных и меньшую задержку, но и новые варианты сервисов, открывающие новые возможности для пользователей.

Международный союз электросвязи (МСЭ, ITU) в рамках разработанной концепции систем связи IMT-2020/5G определил три основных варианта их использования [4]:

1. Улучшенная мобильная широкополосная связь (enhanced Mobile Broadband, eMBW) внутри и вне помещений.
2. Массовые коммуникации машинного типа (massive Machine Type Communications, mMTC), включая Интернет вещей (Internet of Things, IoT), «умное» сельское хозяйство, «умные» города и «умный» дом.
3. Сверхнадежная связь с низкой задержкой (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC), предназначенная для автономных транспортных средств, промышленной автоматизации и роботизации.

Как показано на рисунке 1.1, сервис eMBW фокусируется на услугах с высокой скоростью передачи данных, таких как видео сверхвысокой четкости (UHD-видео) или виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR), в то время как URLLC фокусируется на чувствительных к задержке или критически важных услугах, таких как автономные транспортные средства или удаленная хирургия, а mMTC будет обеспечивать услуги связи с очень высокой плотностью

подключения пользовательского оборудования, таких как "умный город" или массовый интернет вещей (Internet of Things, IoT).

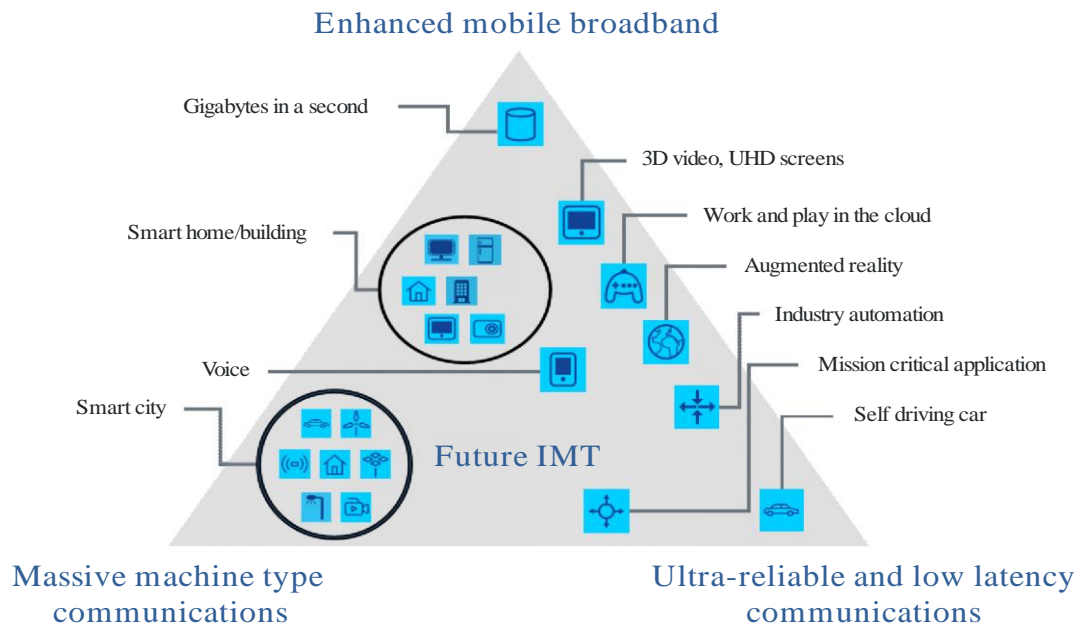


Рисунок 1.1 – Сценарии использования систем связи 5G

На основе этих трех базовых вариантов систем связи пятого поколения может быть создано множество других узкоспециализированных вариантов комплексных решений для удовлетворения новых потребностей быстро развивающейся мобильной индустрии. Расширение услуг связи, вызванное внедрением технологий 5G, позволяет новым категориям устройств, ранее не имевшим мобильной связи, участвовать в глобальной коммуникационной экосистеме.

Таким образом, новый стандарт NR систем связи пятого поколения 5G – это унифицированное решение, направленное на удовлетворение многих, иногда противоречивых требований к производительности системы и общему качеству услуг, для которых NR обеспечивает бесперебойную беспроводную связь и, таким образом, обеспечивает функционирование всего, что связано по беспроводной сети. По этой причине, новое поколение систем беспроводной связи 5G должно обеспечивать подключение и доступ к информации, где бы и когда бы ни находился пользователь.

1.2. Неавтономные сети 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, как показано на рисунке 1.2. 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.

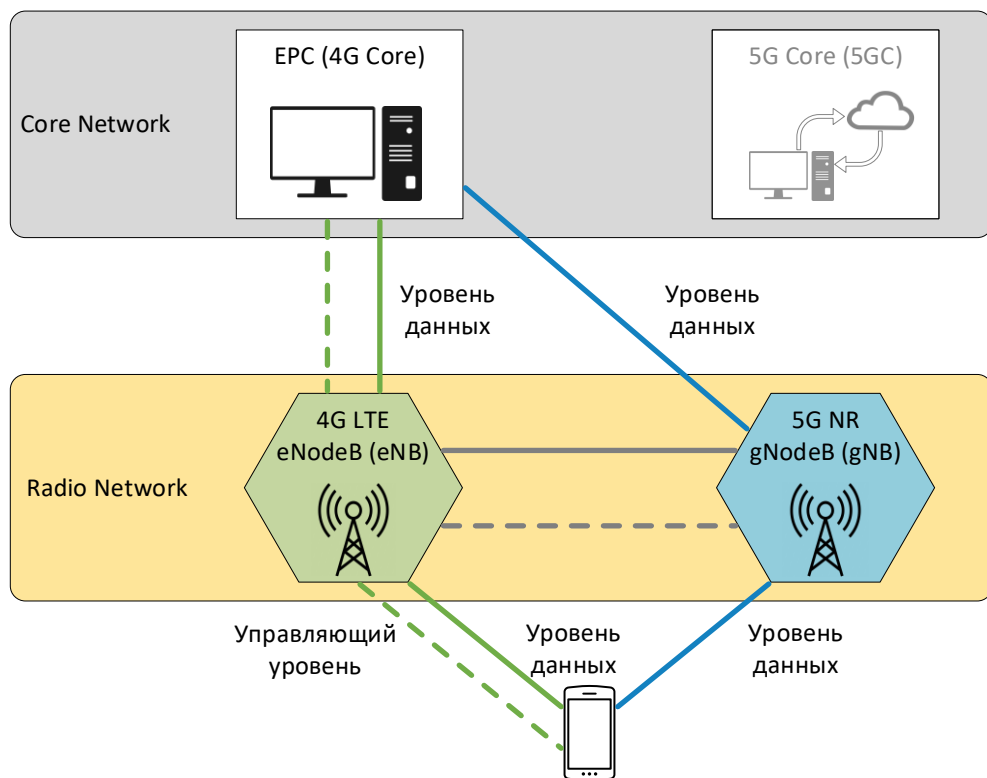


Рисунок 1.2 – Диаграмма модели развертывания неавтономных сетей 5G

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. Причем данная проблема оказалась существенной как для пользовательского оборудования, так и для базовых станций.
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). Таким образом, для поддержания прежнего уровня помехозащищенности, необходим комплекс мер по снижению вероятности пакетных ошибок при передаче по восходящему каналу связи, т.е. от пользовательского оборудования базовой станции.
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.

Перечисленные проблемы отдельно описаны далее в Главе 1.

1.3. Энергоэффективность пользовательского оборудования в 5G

Сектор радиосвязи Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Р) определяет энергоэффективность как одно из минимальных технических требований к производительности для стандарта систем мобильной сотовой связи ИМТ-2020 (Международная мобильная связь 2020). Согласно отчету МСЭ-Р [1], энергоэффективность устройства может быть оценена, исходя из двух критериев:

- 1) эффективности передачи данных в случае высокой загруженности системы связи;
- 2) низкого энергопотребления при отсутствии передаваемых данных.

Эффективная передача данных в случае высокой загруженности системы связи демонстрируется средней спектральной эффективностью. Низкое энергопотребление при отсутствии данных можно оценить по доле времени, в котором пользователь находится в спящем режиме.

Время автономной работы пользовательского оборудования (user equipment, UE) является важным аспектом пользовательского опыта, который влияет на внедрение новых поколений оборудования и услуг 5G. Крайне важно изучить энергопотребление пользовательского оборудования для первых релизов сетей пятого поколения, а также определить и принять методы и принципы для улучшения, чтобы обеспечить энергоэффективность пользовательского оборудования для 5G по крайней мере, не хуже, чем у UE в 4G.

В системах связи стандарта NR пользовательские данные, как правило, являются пакетными и передаются в очень короткие промежутки времени. Одним из эффективных механизмов энергосбережения UE является обеспечение включения UE для доступа к сети из режима энергосбережения в моменты времени, когда это необходимо.

Заметная часть потребляемой пользовательским оборудованием энергии в 5G NR, как и в 4G LTE, приходится на режим доступа к сети (RRC_CONNECTED), что

обуславливается обработкой всей агрегированной полосы частот, активными электрическими радиочастотными цепями приема/передачи, мониторингом контрольной информации, а также динамическими переходами в энергосберегающий режим и выходами из него. В системах связи 5G данные для пользователей, как правило, передаются отдельными пакетами за короткие промежутки времени. По этой причине самым эффективным механизмом энергосбережения UE является включение электрической схемы радиоприемника UE и мониторинг управляющей (контрольной) информации от базовой станции о планировании передачи данных по нисходящей линии связи (Downlink Control Information, DCI) только в те моменты времени, когда это необходимо. Поскольку большую часть времени базовая станция не передает данные конкретному пользователю (или передает очень небольшие объемы данных), необходима схема энергосбережения для пользовательского оборудования, обеспечивающая динамическую адаптацию к изменению структуры (паттерна) трафика поступающих данных. Другими словами, трафик пакетов данных часто бывает очень интенсивным, с периодическими интервалами передачи, за которыми следуют более длительные периоды «молчания». С точки зрения задержки, полезно отслеживать управляющую сигнализацию нисходящей линии связи (Downlink) от базовой станции к пользователю в каждом слоте, чтобы получать гранты (разрешения) для передачи по восходящей линии связи (Uplink grant) или передачи данных по нисходящей линии связи и мгновенно реагировать на изменения в поведении трафика. В то же время, такой график мониторинга сопряжен с большими затратами с точки зрения энергопотребления устройства, так как энергозатраты электрической схемы приемника в мобильном устройстве составляют большую часть от его общего энергопотребления.

Для обеспечения контроля над энергопотреблением пользовательского оборудования в стандарте LTE была внедрена схема прерывистого приема (discontinuous reception scheme, DRX scheme [1, 5]). Данная схема была унаследована стандартом NR [2] с доработками, учитывающими новые

нумерологии, поддерживаемые стандартом связи NR для систем связи 5G. Основным направлением для дальнейшей работы над повышением энергоэффективности пользовательского оборудования для стандарта NR систем мобильной связи пятого поколения является всестороннее улучшение характеристик данной схемы [6 - 9].

1.4. Энергосбережение пользовательского оборудования в мобильных системах связи 4G LTE

1.4.1. Схема прерывистого приема

Основным элементом DRX схемы является настраиваемый DRX цикл. При сконфигурированном DRX цикле пользовательское оборудование мобильного устройства отслеживает контрольную информацию, передаваемую по нисходящей линии связи, только в активном состоянии, переходя в спящий режим, т.е., выключая электрическую схему приемника, в оставшееся время (см. блок-схему на рисунке 1.3).

Это позволяет значительно снизить энергопотребление: чем дольше цикл, тем больший процент времени пользовательское оборудование находится в спящем режиме, т.е. тем ниже среднее энергопотребление в единицу времени. Однако это подразумевает введение ограничений для планировщика базовой станции, поскольку передача для мобильного устройства может быть запланирована и доведена до него только тогда, когда оно активно (включен его приемник) в соответствии с DRX циклом.

Во многих ситуациях, если передача на мобильное устройство была запланирована и устройство активно принимает или передает данные, весьма вероятно, что в ближайшем будущем будет запланирована следующая передача.

Одной из причин может быть то, что было невозможно передать все данные из буфера передачи при использовании одной передачи по нисходящей линии связи, и, следовательно, необходимы дополнительные передачи.

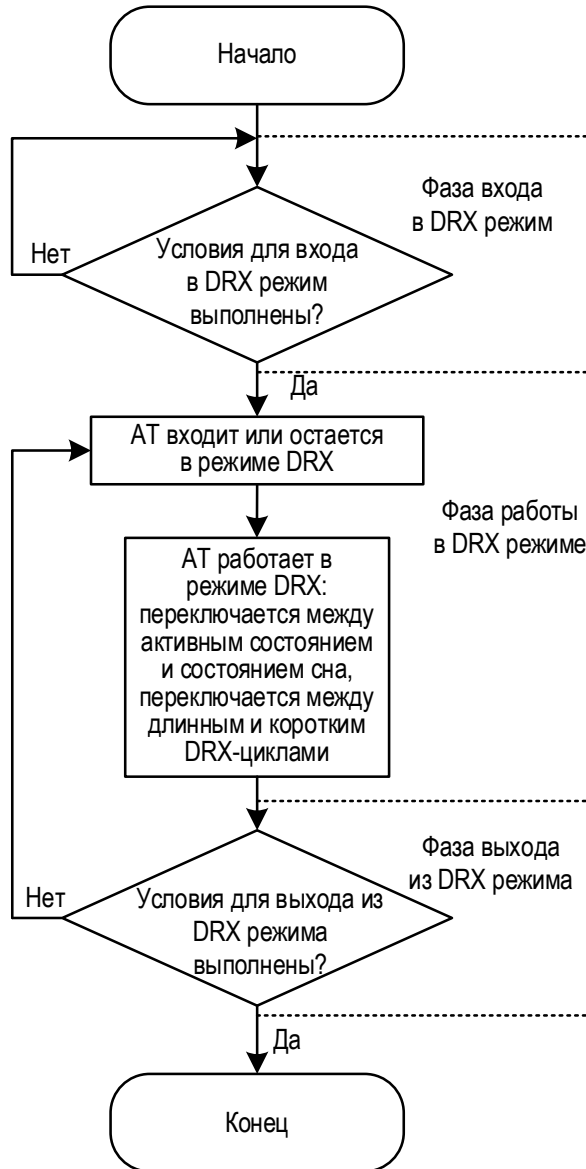


Рисунок 1.3 – Блок-схема алгоритма работы прерывистого приема

Ожидание следующего активного периода, т.е. режима On duration в начале следующего цикла, в соответствии со схемой DRX приведет к дополнительным задержкам. Следовательно, чтобы уменьшить задержки, мобильное устройство пользователя остается в активном состоянии, т.е. с включенным приемником, в течение определенного настраиваемого времени после последней передачи от базовой станции. Пользовательское оборудование реализует это, запуская таймер

бездействия (Inactivity timer) каждый раз после приема данных, и оставаясь до окончания таймера в режиме включенного приемника для мониторинга следующего планирования передачи данных от базовой станции. В связи с тем, что стандартом связи NR поддерживается несколько нумерологий, длительности работы таймеров DRX схемы ниже указаны в миллисекундах для отвязки периодичности DRX от определенной нумерологии.

1.4.2. Проблемные места схемы прерывистого приема

На рисунке 1.4 приведены диаграммы распределения расхода энергии во времени при использовании схемы прерывистого приема DRX (в соответствии со стандартом NR Release-15) и распределения размера буфера данных для передачи на базовой станции. На рисунке 1.4 показаны основные состояния и таймеры схемы DRX:

1. Глубокий сон (deep sleep) – неактивное состояние с наименьшим расходом энергии в единицу времени. UE переходит в данное состояние, если временной интервал до следующего перехода в активное состояние больше или равно 20 мс. На рисунке 1.4 показано желтым цветом.
2. Легкий сон (light sleep) – неактивное состояние с большим расходом энергии в единицу времени, чем в состоянии глубокого сна. UE переходит в данное состояние, если временной интервал до следующего перехода в активное состояние больше или равно 6 мс и меньше 20 мс. На рисунке 1.4 показано зеленым цветом.
3. Активное состояние – режим, в котором пользовательским оборудованием производится мониторинг контрольной информации и/или прием данных. UE находится в данном режиме во время включенных таймеров On duration (начало каждого DRX цикла) и Inactivity timer (после каждого приема данных). На рисунке 1.4

промежутки времени, когда UE находится в активном состоянии, показаны синим цветом (таймер On Duration) и фиолетовым цветом (Inactivity timer).

Как можно увидеть из рисунка 1.4, за счет периодического перехода в состояние сна, т.е. отключения электрической схемы приемника, значительно сокращается среднее количество потраченной пользователем энергии за единицу времени. Однако из приведенных диаграмм также видно, что в течение каждого DRX цикла существуют отрезки времени, в течение которых пользовательское оборудование было в активном состоянии, в то время, когда на базовой станции не было ни одного пакета данных для этого пользователя.

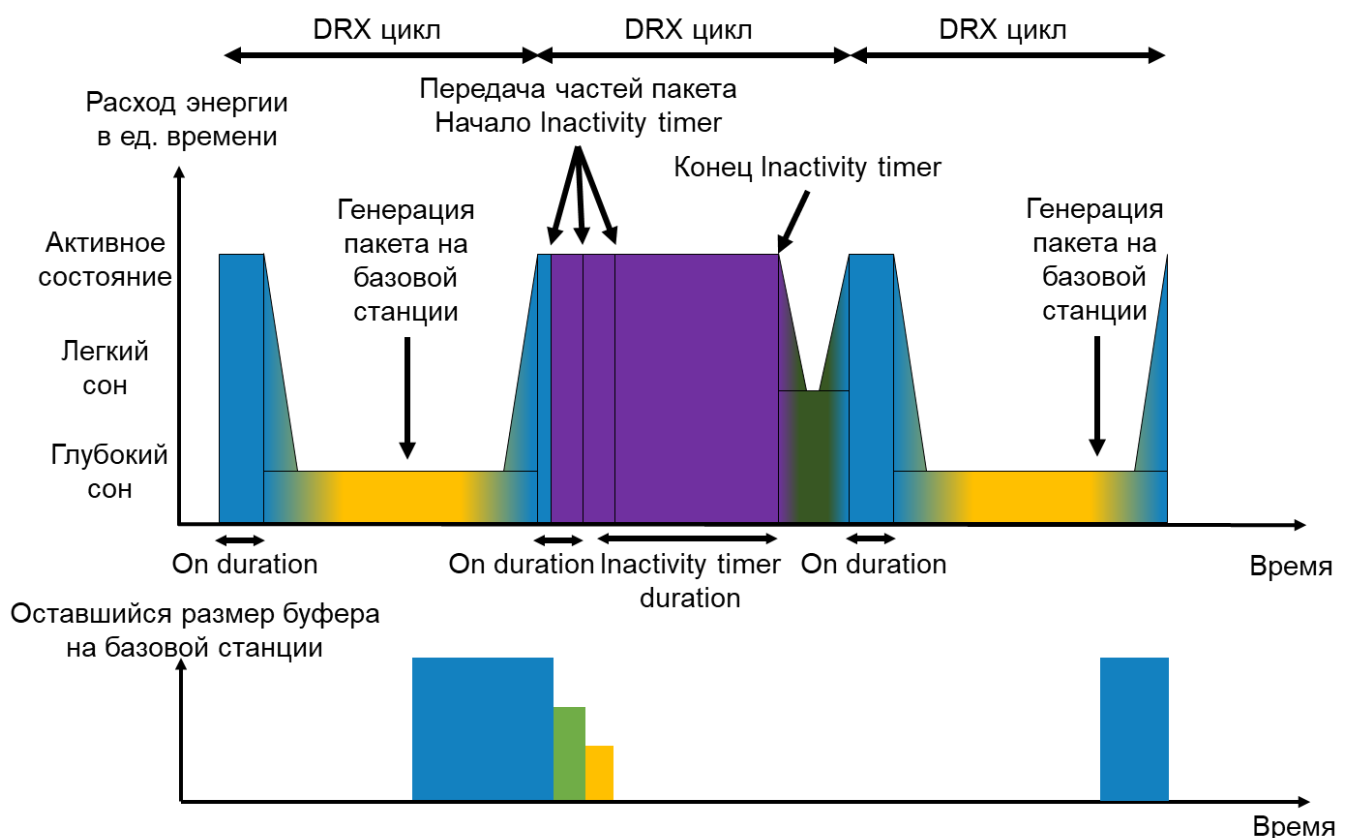


Рисунок 1.4 – Распределение расхода энергии по времени при использовании схемы прерывистого приема

Таким образом, из проведенного анализа можно выделить два основных проблемных места DRX схемы из стандарта 4G LTE:

1. Продолжительность состояния On duration в случае, когда на базовой станции нет пакета для пользователя перед началом DRX цикла (первый и третий DRX циклы).
2. Большая продолжительность таймера Inactivity после передачи последней части пакета (DRX цикл 2). В данном случае, если в течение таймера Inactivity на базовой станции не появился новый пакет, то в течение всего таймера пользователь также находится в активном состоянии в то время, как на базовой станции нет пакета для пользователя.

1.5. Порог помехоустойчивости систем связи 5G

В системах связи покрытие измеряется максимально допустимыми общими потерями в тракте (Maximum Allowable Path Loss, MAPL), которые обозначают верхний предел потерь в канале, при котором обеспечивается допустимый уровень отношения мощности принятого сигнала к общей мощности шума и помехи (отношение сигнал-шум-помеха, ОСПШ, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR), т.е. при котором обеспечивается SINR выше порога помехоустойчивости. На это влияют различные факторы, такие как мощность передачи, коэффициент усиления антенны, несущая частота, ширина полосы частот, общие характеристики системы и производительность приемника. Среди перечисленных факторов несущая частота оказывает прямое и одно из наиболее серьезных влияний на общие потери в тракте (Pathloss, PL), так как чем выше несущая частота, тем выше ослабление радиосигнала при прохождении через канал связи. По сравнению с 4G LTE, системы связи 5G стандарта NR работают на относительно более высокой несущей частоте в среднечастотном диапазоне. Таким образом, очевидно, что более высокие потери в мощности сигнала при распространении в беспроводном канале создают необходимость снижения порога помехоустойчивости системы 5G

для поддержания стабильного обслуживания пользователей на краю ячейки сотовых сетей 5G, особенно для NSA типа развертывания.

Достаточно низкий порог помехоустойчивости является одним из основных критериев, которые компании учитывают при развертывании сетей сотовой связи, поскольку оно напрямую влияет на стабильность обслуживания пользователей. Данный показатель является ключевым для сервиса голосовой связи, т.е. наиболее распространенного варианта использования систем связи и имеющего особое значение при коммерциализации систем мобильной связи, и для которого типичный пользователь всегда ожидает повсеместного покрытия.

Начиная с первого релиза стандарта NR (NR Release-15), для передачи по каналу для передачи данных по восходящей линии связи может быть использовано несколько повторений передачи, чтобы снизить порог помехоустойчивости. Для дальнейшего снижения порога за счет использования частотного разнесения может быть также использована межслотовая перестройка частоты.

В то же время, существенным недостатком в NR Release-15 является то, что поддерживается планирование передачи транспортного блока данных (transport block, TB), передаваемого по PUSCH (канал передачи данных по восходящей линии связи), ограниченного в пределах одного слота. Другими словами, распределение ресурсов для каждой передачи данных ограничено одним слотом. По этой причине размер транспортного блока (transport block size, TBS) определяется на основе количества ресурсных элементов (resource element, RE) в слоте, которого может быть недостаточно для обеспечения достаточно низкой скорости кодирования для пользовательского оборудования на границе ячейки системы сотовой связи (cell edge UE).

Во время стадии исследования покрытия систем связи 5G для NR Release-17 (NR Release-17 Coverage Enhancement) консорциум 3GPP (3rd Generation Partnership Project) определил каналы связи, перечисленные в техническом отчете (technical report, TR) 38.830 [10], в качестве потенциально узких мест с точки зрения помехоустойчивости систем 5G, а также на основе анализа показателей, связанных

с качеством обслуживания (quality of service, QoS [11 - 13]) для каждой услуги и сценария. Приоритетными каналами, т.е. в первую очередь нуждающимися в понижении порога помехоустойчивости, т.е. в снижении вероятности пакетных ошибок при критически низких уровнях ОСПШ, выбраны каналы передачи данных по восходящей линии связи (physical uplink shared channel, PUSCH) для расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB), особенно для передачи голоса по протоколу IP (VoIP). Это объясняется тем, что из-за относительно меньшей мощности передатчика пользовательского оборудования по сравнению с мощностью передатчика базовой станции, ОСПШ принятого сигнала при передаче данных по восходящему каналу связи относительно меньше, чем при передаче данных по нисходящей линии связи [14].

Проблема низкого уровня мощности принятого сигнала от пользователя на границе соты в системах беспроводной мобильной связи активно обсуждается еще со стадии разработки стандарта LTE. Методы и подходы к понижению порога помехоустойчивости систем связи были разработаны как для узконаправленных сценариев использования [15 - 17], так и в целом для стандартов LTE [18, 19] и NR [20 - 25].

1.6. Методы снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 4G LTE

1.6.1. Переключение частоты

В LTE при передаче по восходящей линии связи (uplink) выделенные ресурсы для одной передачи должны быть локализованы для обеспечения устойчивости к смещению частоты по сравнению с распределенным выделением ресурсов (распределенным ресурсным аллокациям). Локализованное распределение

ресурсов также необходимо для сохранения одной несущей частоты при передаче по восходящей линии связи. Как следствие, выигрыша от частотного разнесения ресурсов практически нет. В то же время, при передаче по нисходящей линии связи можно выделить непересекающиеся наборы блоков физических ресурсов для UE, чтобы извлечь некоторый выигрыш от частотного разнесения. Для устранения недостатка восходящей линии связи в LTE ввели поддержку скачкообразного переключения частоты для передачи данных по PUSCH, что обеспечивает дополнительный выигрыш за счет частотного разнесения для передачи по восходящей линии связи. В случае неполной загрузки системы скачкообразное переключение частоты также может обеспечить усреднение помех от передач других устройств.

В LTE поддерживается перестройка частоты (frequency hopping, FH) как внутри субкадра (subframe), так и между субкадрами, как показано на рисунке 1.5. При внутрикадровой перестройке UE переходит к ресурсной аллокации на другой частоте в пределах одного и того же субкадра; при межкадровой перестройке частота ресурсной аллокации изменяется от одного субкадра к другому. Таким образом, внутрикадровая перестройка частоты обеспечивает выигрыш от разнесения по частоте за одну передачу, которая всегда охватывает только один субкадр. В случае переключения частоты между субкадрами требуется несколько передач, т.е. использование гибридной схемы повторной передачи с автоматическим запросом (hybrid automatic repeat request, HARQ) для того, чтобы обеспечить выигрыш за счет разнесения частот.

Если в блоке контрольной информации, в однобитовом поле, отвечающем за перестройку частоты, установлено значение 1, UE должен выполнить перестройку частоты при передаче по каналу PUSCH; в противном случае перестройка частоты при передаче по PUSCH не выполняется.

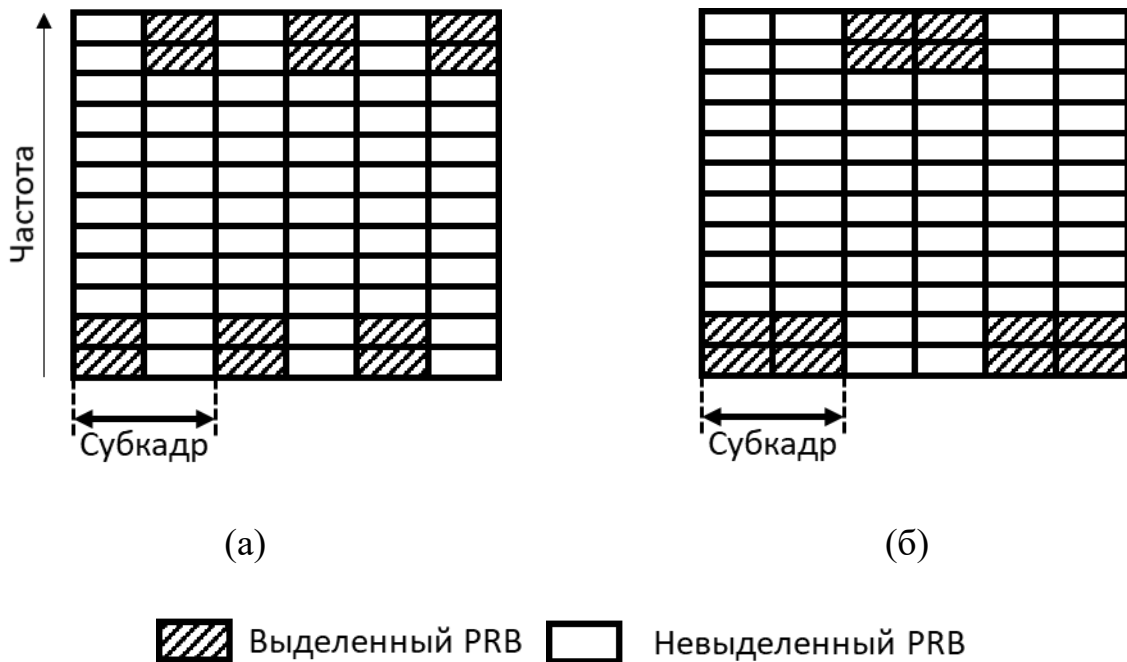


Рисунок 1.5 – Пример распределения частотно-временных ресурсов при переключении частот: а – внутри субкадра, б – между субкадрами

Для моделирования переключения частоты позиции опорных сигналов демодуляции (demodulation reference signals, DM-RS) были выбраны из значений, определенных для систем связи стандарта NR. В таблицах 1.1 и 1.2 представлены позиции символов DM-RS для случая без переключения частоты внутри субкадра и с переключением частоты внутри субкадра, соответственно [26].

В данных таблицах, l_d – количество символов в каждой ресурсной аллокации в слоте; l_0 – позиция первого DM-RS символа; $dmrs\text{-}AdditionalPosition = posX$ – количество дополнительных символов DM-RS в каждой ресурсной аллокации в слоте равное X.

Пример распределения символов DM-RS в слоте показан на рисунке 1.6 для случая с переключением частоты внутри субкадра, для конфигурации с $l_d = 7$, $l_0 = 2$ и $dmrs\text{-}AdditionalPosition = pos1$.

Таблица 1.1 – Позиции DM-RS символов без переключения частоты

l_d , в символах	Позиции DM-RS символов			
	<i>dmrs-AdditionalPosition</i>			
	<i>pos0</i>	<i>pos1</i>	<i>pos2</i>	<i>pos3</i>
<4	-	-	-	-
4	l_0	l_0	l_0	l_0
5	l_0	l_0	l_0	l_0
6	l_0	l_0	l_0	l_0
7	l_0	l_0	l_0	l_0
8	l_0	$l_0, 7$	$l_0, 7$	$l_0, 7$
9	l_0	$l_0, 7$	$l_0, 7$	$l_0, 7$
10	l_0	$l_0, 9$	$l_0, 6, 9$	$l_0, 6, 9$
11	l_0	$l_0, 9$	$l_0, 6, 9$	$l_0, 6, 9$
12	l_0	$l_0, 9$	$l_0, 6, 9$	$l_0, 5, 8, 11$
13	l_0	$l_0, 11$	$l_0, 7, 11$	$l_0, 5, 8, 11$
14	l_0	$l_0, 11$	$l_0, 7, 11$	$l_0, 5, 8, 11$

Таблица 1.2 – Позиции DM-RS символов при переключении частоты

l_d , в символах	Позиции DM-RS символов							
	$l_0 = 2$				$l_0 = 3$			
	<i>dmrs-AdditionalPosition</i>				<i>dmrs-AdditionalPosition</i>			
	<i>pos0</i>		<i>pos1</i>		<i>pos0</i>		<i>pos1</i>	
первая часть	вторая часть	первая часть	вторая часть	первая часть	вторая часть	первая часть	вторая часть	
≤ 3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2	0	2	0	3	0	3	0
5, 6	2	0	2	0, 4	3	0	3	0, 4
7	2	0	2, 6	0, 4	3	0	3	0, 4

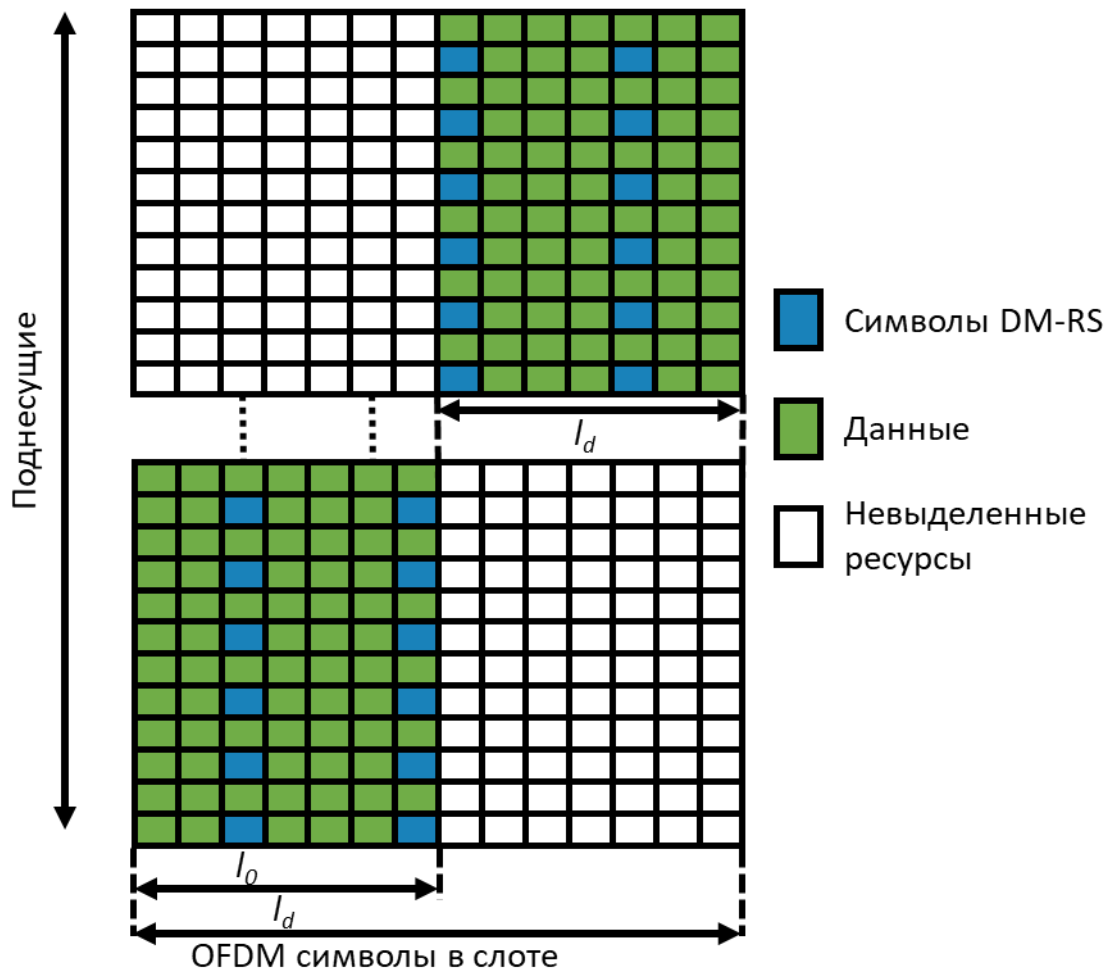


Рисунок 1.6 – Пример распределения символов DM-RS для случая с переключением частоты внутри субкадра

1.6.2. Повторение передачи

В стандарте связи LTE помимо гибридной схемы повторной передачи с автоматическим запросом поддерживается схема повторения передачи, в том числе для PUSCH канала. Данная схема без изменений была унаследована стандартом NR, начиная с первого релиза NR Release-15.

В случае, когда базовая станция в блоке контрольной информации для передачи данных по восходящему каналу связи сигнализирует количество повторений $K > 1$, в течение K последовательных слотов UE должно повторить транспортный блок данных, используя одну и ту же ресурсную аллокацию в

каждом слоте. Порядок версий избыточности кодов с малой плотностью проверки на четность для повторения передачи совпадает с порядком для гибридной схемы повторной передачи с автоматическим запросом, т.е. равен $\{0, 2, 3, 1\}$.

Для схемы повторения передачи из стандарта LTE можно выделить ряд недостатков:

1. Использование одной ресурсной аллокации для всех повторений. Данное ограничение, например, не позволяет использовать межслотовое переключение частоты.
2. Возможность использования только для серии слотов, идущих последовательно во времени. Таким образом, данная схема не может в полной мере использоваться для дуплексной связи с временным разделением (time division duplex, TDD) по причине ограниченного количества последовательных слотов для передачи по восходящей линии связи.

1.7. Нелинейные искажения на передатчике пользовательского оборудования в 5G

При разработке систем связи большое количество исследований было посвящено проблеме компенсации искажений, возникающих при передаче сигнала, таких как нелинейные искажения в усилителе мощности (power amplifier, PA), дисбаланс синфазной (in-phase) и квадратурной (quadrature) компонент (I/Q компонент) в модуляторе и т.д. [27 - 37], поскольку такие явления могут сильно ограничивать производительность системы даже при высоких отношениях сигнал-шум (ОСШ).

Нелинейный режим передатчика пользовательского оборудования в 5G может быть использован как способ сокращения общего энергопотребления, что, однако, оказывает негативное воздействие на уровень помехоустойчивости при

передаче от пользовательского оборудования, т.е. по восходящему каналу связи, по причине внесения дополнительной помехи в передаваемый сигнал, а следовательно, и в сигнал, принятый базовой станцией. Эффективный метод борьбы с нелинейными искажениями принятого сигнала, использующийся на базовой станции, может позволить понизить потребление энергии на пользовательском оборудовании при сохранении прежнего уровня вероятности пакетных ошибок при передаче по восходящему каналу связи при высоких ОСШ.

За последние два десятилетия развития мобильной связи было предложено несколько методов и множество схем предварительного искажения для компенсации нелинейных искажений усилителя мощности на стороне передатчика. Большинство из этих схем [27 - 31] работают по принципу оценки искажений, возникающих при усилении сигнала, путем непосредственного измерения характера искажения сигнала на передающей антенне или путем использования специальных калибровочных сигналов с последующим внесением поправок в передаваемые сигналы в полосе передачи на цифровом уровне. Также, для идентификации нелинейной функции предварительного искажения, которая минимизирует рост спектра в соседних поднесущих, использовались генетические алгоритмы [32].

Основным недостатком большинства предлагаемых схем предварительного искажения на стороне передатчика является их высокая сложность и стоимость. Поэтому эти схемы обычно используются только на крупных базовых станциях или в продвинутых устройствах беспроводной связи.

Следует отметить, что схемы предварительного искажения на стороне передатчика также могут компенсировать дисбаланс I/Q компонент. Однако, поскольку дисбаланс I/Q компонент может также возникать на стороне приемника, более эффективно использовать дополнительную обработку сигнала в основной полосе частот приемника для компенсации нелинейных искажений.

Гораздо меньшее количество работ содержит исследования компенсации нелинейных искажений передатчика на стороне приемника [34, 35]. В то же время,

например, в [34] было предложено обнаружение с максимальным правдоподобием нелинейно искаженных сигналов с несколькими несущими частотами. Специально разработанный алгоритм итеративного декодирования использовался для получения одновременных оценок возможного передаваемого вектора данных символов поднесущей OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) и нелинейных искажений. В [35] эта идея была обобщена и применена к более сложным системам SDMA-OFDM (Space-Division Multiple Access - OFDM). В [36] также был представлен оригинальный алгоритм для компенсации нелинейных искажений усилителя в приемниках с прямой оцифровкой сигнала, а в [37] предлагается алгоритм, который позволяет получать отдельные оценки для дисбаланса I/Q компонент передатчика и дисбаланса I/Q компонент приемника и использовать эту информацию для повышения производительности предлагаемой схемы компенсации.

Актуальность проблемы компенсации нелинейных искажений сигналов, возникающих на стороне передатчика, особенно возросла в связи с развитием Интернета вещей (IoT) в системах 5G.

В таких системах, где приемно-передающая часть сенсорного устройства должна быть реализована с использованием простых и экономически эффективных технических решений, уровень нелинейных искажений передатчика довольно высок, так как при увеличении массовости производства требования к точности выполнения отдельных элементов (конденсаторов, резисторов, транзисторов и т.д.) могут быть снижены, что обязательно приведет к большому разбросу параметров и увеличению относительной ошибки модуляционного созвездия или, другими словами, величины вектора ошибок (EVM) в передаваемых сигналах. Это особенно критично при использовании миллиметровых диапазонов длин волн в сетях 5G. Процессы изготовления радиочастотных компонентов для этих диапазонов значительно сложнее, что приводит к относительно более высоким уровням искажений сигнала.

Кроме того, поскольку в целом сенсорное устройство (UE) в сети Интернета вещей должно быть очень дешевым, использование в нем сложных схем компенсации нелинейных искажений сигнала на передатчике нецелесообразно. В то же время базовые станции (или точки доступа), управляющие работой устройств в сети Интернета вещей, могут собирать статистические данные о характере нелинейных искажений на всех обслуживаемых устройствах и использовать эту информацию для уменьшения ошибок при декодировании символов данных, повышая тем самым энергоэффективность и помехоустойчивость системы связи в целом.

Для реализации предлагаемого метода повышения эффективности развертываемых сетей 5G, в том числе сетей Интернета вещей, следует предусмотреть новую функциональность для используемых в них базовых станций, предусматривающую возможность оптимизировать приемник путем применения различных самообучающихся алгоритмов, основанных на статистическом анализе сигналов, принимаемых от конкретных устройств сетей 5G.

1.8. Выводы

На основе анализа методов, использующихся в системах связи 5G для повышения энергоэффективности и помехоустойчивости пользовательского оборудования, установлены проблемные места систем связи пятого поколения начального релиза NR Release 15 и определены возможные направления разработки новых методов или усовершенствования использующихся методов и алгоритмов для повышения энергоэффективности и помехоустойчивости:

1. Методы, обеспечивающие динамическую адаптацию состояния пользовательского оборудования в системах связи 5G для улучшения

работы схемы прерывистого приема, использующейся в стандарте New Radio релиза NR Release-15.

2. Новая схема передачи данных по восходящему каналу связи для снижения порога помехоустойчивости систем связи пятого поколения, учитывающая недостатки и преимущества используемых схем, таких как межслотовое переключение частоты и повторение передачи.
3. Метод борьбы на стороне приемника с нелинейными искажениями, вызванными на передатчике.

Глава 2 Улучшение методов энергосбережения пользовательского оборудования для мобильных систем связи 5G NR

2.1. Описание системной модели

Моделирование сетей связи пятого поколения для изучения схем энергосбережения пользовательского оборудования проводится с использованием симулятора системного уровня 5G, в котором можно выделить следующие основные блоки:

1. Развертывание сети: расположение базовых станций согласно типовой структуре сети мобильной сотовой связи, генерация координат пользователей случайным образом (см. рисунок 2.1), выбор и инициализация связи с базовой станцией (base station, BS) для каждого пользователя.

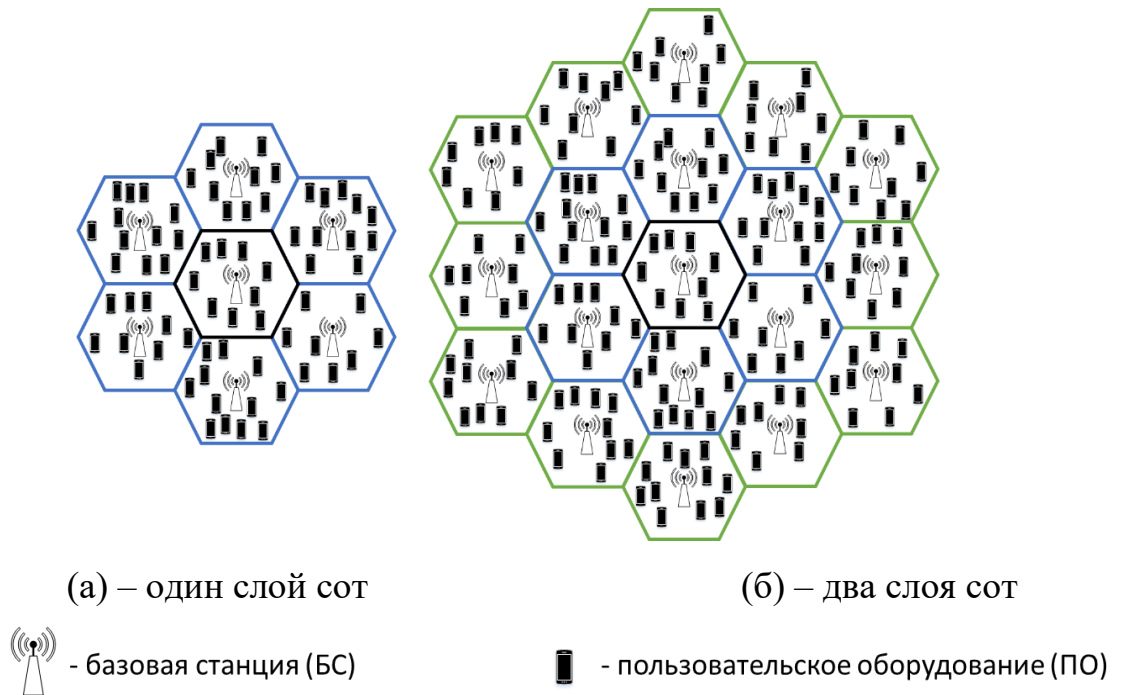


Рисунок 2.1 – Типовая структура сети мобильной сотовой связи

2. Генерация канала связи с последующим обновлением в процессе симуляции системы связи.
3. Генерация обратной связи о состоянии канала от пользователя.
4. Блок обработки состояния пользователя согласно алгоритму работы DRX схемы.
5. Планировщик передач на базовой станции, выбирающий пользователя (группу пользователя для MIMO схемы передачи), оптимальный ранг (количество пространственных каналов передачи) и оптимальную конфигурацию диаграммы направленности, используя многопользовательский алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания.
6. Блок учета интерференции между базовыми станциями.
7. MMSE приёмник.
8. Абстракция оценки канала связи для имитации ошибки при оценивании.
9. Абстракция канального кодирования/декодирования на физическом уровне для схемы помехоустойчивого кодирования с использованием кодов с малой плотностью проверки на четность (low-density parity-check, LDPC) из стандарта связи NR.

2.1.1. Сценарии моделирования беспроводных мобильных систем связи на системном уровне

Существуют три ключевых сценария, разработанных 3GPP для моделирования систем связи четвертого и пятого поколений на системном уровне [38]:

1. Urban Micro, UMi (открытая местность): базовые станции монтируются ниже уровня крыш окружающих зданий. Открытая площадка UMi предназначена для имитации реальных сценариев, таких как город или

привокзальная площадь. Ширина типичной открытой площадки составляет порядка 50 – 100 м.

Пример для нисходящего канала связи:

- 1) высота передатчика (базовой станции): 10 м
 - 2) высота приемника: 1,5 – 2,5 м
 - 3) размер географической ячейки сети связи, ISD: 200 м
2. Urban Macro, UMa: базовые станции монтируются над уровнями крыш окружающих зданий.

Пример для нисходящего канала связи:

- 1) высота передатчика (базовой станции): 25 м
 - 2) высота приемника: 1,5 – 2,5 м
 - 3) размер географической ячейки сети связи, ISD: 500 м
3. Indoor (внутри помещения) сценарий: предназначен для описания различных типичных сценариев развертывания сети связи внутри помещений, включая офисные помещения и торговые центры. Типичная офисная среда состоит из открытых кабинетов, отделенных стенами офисов, открытых площадок, коридоров и т.д. Базовые станции монтируются на высоте 2-3 м либо на потолках, либо на стенах. Торговые центры часто имеют высоту 1-5 этажей и могут включать в себя открытую площадку, разделяемую несколькими этажами. В таком случае, базовые станции монтируются на высоте примерно 3 м на стенах или потолках коридоров и цехов.

Детали описанных выше сценариев представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры сценариев моделирования систем 5G

Сценарий		UMi	UMa	Indoor
Структура сети		Шестиугольная (hexagonal) решетка из 19 микроячеек, поделенных на 3 сектора		120 x 50 x 3, м
Расстояние между BS, м		200	200 / 500	20
Высота антенны BS h_{BS} , м		10	25	3 (потолочное расположение)
Доля UE внутри помещения		80%	80%	100%
Мобильность UE в горизонтальной плоскости, км/ч		3	3	3
Минимальное расстояние между BS и UE в горизонтальной плоскости, м		10	35	0
Распределение UE в горизонтальной плоскости		Равномерное		
Локация UE	Вне / внутри помещения	Вне и внутри помещения		Внутри помещения
	В / вне прямой видимости	В прямой видимости и вне прямой видимости		
Высота h_{UT} , м	общая формула	$h_{UT}=3(n_{fl} - 1) + 1,5$		1
	n_{fl} для UE вне помещения	1	1	
	n_{fl} для UE внутри помещения	n_{fl} - равномерно распределен в границах (1, N_{fl}), где N_{fl} - равномерно распределен в границах (4, 8)		

2.1.2. Модели трафика мобильных систем связи

Перед началом разработки систем беспроводной мобильной связи четвертого поколения 4G LTE модели трафика были представлены на 3GPP TSG-RAN1#48 в документе [39], который содержит конкретные примеры и соответствующие параметры для каждой модели для изучения производительности сетей связи на физическом уровне. Он включает комплексные модели трафика для наиболее важных сервисов, таких как FTP, просмотр веб-страниц, потоковое видео, игры и модель голосового трафика VoIP.

В таблице 2.2 показано процентное распределение трафика пользователей мобильных систем связи.

Таблица 2.2 – Процентное распределение трафика пользователей

Модель	Категория трафика	Процент пользователей
FTP	Сервис с негарантированной доставкой	10%
Web Browsing	Интерактивный	20%
Video Streaming	Потоковая передача данных	20%
VoIP	Трафик с передачей в реальном времени	30%
Gaming	Интерактивный трафик с передачей в реальном времени	20%

Модель трафика передачи голоса по протоколу IP

Рассмотрим простую модель голосовой активности с двумя состояниями, показанную на рисунке 2.2.

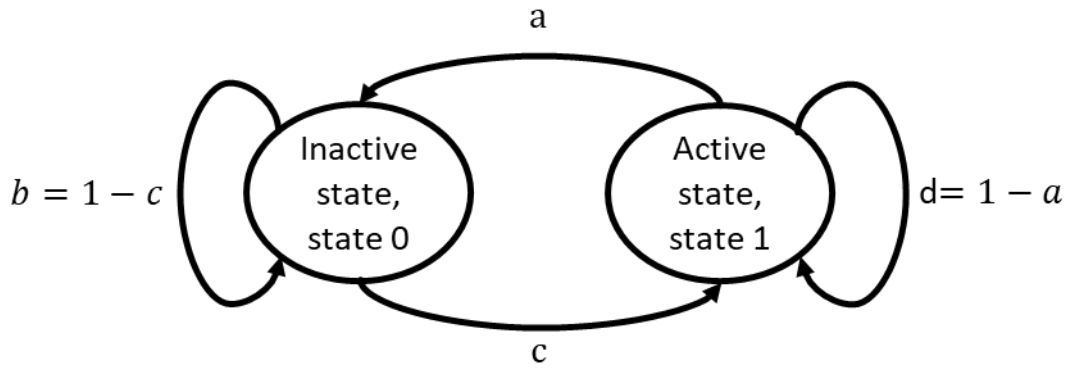


Рисунок 2.2 – Модель голосовой активности для одного спикера

В данной модели вероятность перехода из состояния 1 (активное речевое состояние) в состояние 0 (неактивное или беззвучное состояние), находясь в состоянии 1, равна a , в то время как вероятность перехода из состояния 0 в состояние 1, находясь в состоянии 0, равна c . Предполагается, что состояние в модели обновляется с частотой равной частоте кадров речевого кодера $R = 1/T$, где T - длительность кадра кодера (обычно 20 мс).

Если P_0 и P_1 — соответственно вероятности нахождения в состоянии 0 и состоянии 1, то:

$$P_0 = \frac{a}{a+c}, \quad (2.1)$$

$$P_1 = \frac{c}{a+c}. \quad (2.2)$$

Основным параметром модели является коэффициент голосовой активности (Voice Activity Factor, VAF), который может быть вычислен из данных выше вероятностей и равен:

$$\lambda = P_1 = \frac{c}{a+c}. \quad (2.3)$$

Речевой поток (talk-spurt, TS) определяется как период времени τ_{TS} между входом в активное состояние (состояние 1) и выходом из активного состояния.

Средняя длительность речевого потока μ_{TS} , измеряемая в голосовых кадрах, определяется как:

$$\mu_{TS} = \frac{1}{a}. \quad (2.4)$$

Таким же образом определяется средняя длительность периода молчания (silent period, SP):

$$\mu_{SP} = \frac{1}{c}. \quad (2.5)$$

Поскольку переходы состояний из состояния 1 в состояние 0 и наоборот независимы, среднее время μ_{AE} между входами в активные состояния определяется суммой средних времен в каждом состоянии:

$$\mu_{AE} = \mu_{TS} + \mu_{SP}. \quad (2.6)$$

Соответственно, средняя частота R_{AE} наступления перехода в активное состояние равна:

$$R_{AE} = \frac{1}{\mu_{AE}}. \quad (2.7)$$

Модель FTP трафика

Сеанс FTP — это последовательность передач файлов, разделенных временем их чтения. Двумя основными параметрами сеанса FTP являются:

1. Размер S передаваемого файла;
2. Время чтения D — интервал времени между генерациями предыдущего файла и следующего.

В таблице 2.3 представлены статистические характеристики для размера файла и времени чтения для моделей FTP трафика.

Таблица 2.3 – Параметры FTP модели трафика

Параметр	Статистические характеристики
Размера файла S	<p>FTP model 1:</p> <p>Усеченное логнормальное распределение</p> <p>$\langle S \rangle = 2$ Мбайт;</p> <p>$\sigma_S = 0,722$ Мбайт;</p> <p>$S_{max} = 5$ Мбайт.</p> <p>Функция плотности вероятности до усечения:</p> $f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x > 0; \sigma = 0,35; \mu = 14,45.$ <p>FTP model 3:</p> <p>Фиксированное значение 0,5 Мбайт.</p>
Время чтения D	<p>Экспоненциальное распределение</p> <p>Функция плотности вероятности:</p> $f_x = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0.$ <p>FTP model 1:</p> <p>$\langle D \rangle = 180$ сек; $\lambda = 0,006$.</p> <p>FTP model 3:</p> <p>$\langle D \rangle = 0,2$ сек; $\lambda = \frac{1}{\langle D \rangle} = 5$.</p>

Далее в данной работе используется третья версия модели FTP трафика (FTP model 3) с выбираемыми значениями размера пакета и времени чтения для обеспечения определенной загрузки системы.

При изучении систем связи пятого поколения стандарта NR также выделяют модель трафика мгновенных сообщений (Instant messaging), которая является определенной конфигурацией FTP model 3 с размером пакета $S = 0,1$ Мбайт и средним временем чтения $\langle D \rangle = 2$ сек.

Модель трафика просмотра веб-страниц

В модели интерактивного трафика Web-browsing веб-страница состоит из основного объекта и встроенных объектов (например, изображений, рекламы и т.д.). После получения главной страницы веб-браузер выполняет синтаксический анализ для поиска встроенных объектов и производится скачивание найденных встроенных объектов. Основными параметрами, характеризующими модель трафика просмотра веб-страниц, являются:

1. Размер основного объекта S_M ;
2. Размер встроенного на странице объекта S_E ;
3. Количество встроенных объектов N_D ;
4. Время чтения D ;
5. Время синтаксического анализа страницы T_P .

В таблице 2.4 ниже представлены статистические характеристики для основных параметров модели трафика Web-browsing.

Таблица 2.4 – Параметры модели трафика Web-browsing

Параметр	Статистические характеристики
Размер основного объекта S_M	<p>Усеченное логнормальное распределение</p> <p>$\langle S_M \rangle = 10710$ байт;</p> <p>$\sigma_{S_M} = 25032$ байт;</p> <p>$S_{M_{min}} = 100$ байт;</p> <p>$S_{M_{max}} = 2$ Мбайт.</p> <p>Функция плотности вероятности до усечения:</p> $f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x > 0; \sigma = 1,37; \mu = 8,37$

Продолжение таблицы 2.4

Размер встроенного на странице объекта S_E	<p>Усеченное логнормальное распределение</p> <p>$\langle S_E \rangle = 7758$ байт;</p> <p>$\sigma_{S_E} = 126168$ байт;</p> <p>$S_{E_{min}} = 50$ байт; $S_{E_{max}} = 2$ Мбайт.</p> <p>Функция плотности вероятности до усечения:</p> $f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x > 0; \sigma = 2,36; \mu = 6,17.$
Количество встроенных объектов N_D	<p>Усеченное Парето распределение</p> <p>$\langle N_D \rangle = 5,64$; $N_{D_{max}} = 53$.</p> <p>Функция плотности вероятности до усечения:</p> $f_x = \frac{\alpha k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, k \leq x < m,$ $f_x = \left(\frac{k}{m}\right)^\alpha, x = m; \alpha = 1,1; k = 2; m = 55.$ <p>Примечание: чтобы получить N_D, нужно вычесть k из сгенерированного случайного значения</p>
Время чтения D	<p>Экспоненциальное распределение</p> <p>$\langle D \rangle = 30$ сек.</p> <p>Функция плотности вероятности:</p> $f_x = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0; \lambda = 0,033.$
Время синтаксического анализа страницы T_P	<p>Экспоненциальное распределение</p> <p>$\langle D \rangle = 0,13$ сек.</p> <p>Функция плотности вероятности:</p> $f_x = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0; \lambda = 7,69.$

Модель трафика потокового видео

В данной модели трафика потокового видео (Video Streaming) каждый кадр видеоданных поступает с периодом T , определяемым количеством кадров в секунду. Каждый кадр разбивается на фиксированное количество фрагментов,

каждый из которых передается как один пакет. Задержка кодирования между фрагментами кадра задается временем работы видеокодера.

В таблице 2.5 представлены статистические характеристики для основных параметров модели трафика Video Streaming. Параметры функций распределения в данной таблице предполагают исходную скорость видеосигнала 64 кбит/с.

Таблица 2.5 – Параметры модели трафика Video Streaming

Параметр	Статистические характеристики
Время между началами кадров	Фиксированное значение равное 100 мс (10 кадров в секунду)
Число фрагментов кадра	Фиксированное значение равное 8 фрагментам на кадр
Размер фрагмента S_f	Усеченное Парето распределение $\langle S_f \rangle = 10$ байт; $S_{f_{max}} = m = 250$ байт. Функция плотности вероятности до усечения: $f_x = \frac{\alpha k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, k \leq x < m;$ $f_x = \left(\frac{k}{m}\right)^\alpha, x = m;$ $\alpha = 1,2; k = 20$ байт.
Время между поступлениями фрагментов кадра	Усеченное Парето распределение $\langle T_s \rangle = 6$ мс; $T_{s_{max}} = m = 12,5$ мс. Функция плотности вероятности до усечения: $f_x = \frac{\alpha k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, k \leq x < m;$ $f_x = \left(\frac{k}{m}\right)^\alpha, x = m;$ $\alpha = 1,2; k = 2,5$ мс.

Модель игрового трафика

По аналогии с моделью FTP трафика, модель игрового трафика (Gaming) описывается двумя основными параметрами:

1. Размер S передаваемого файла;
2. Время чтения D — интервал времени между поступлениями предыдущего файла и следующего.

В таблице 2.6 ниже представлены статистические характеристики для основных параметров модели трафика Gaming.

Таблица 2.6 – Параметры модели трафика Gaming

Параметр	Статистические характеристики
Время поступления первого пакета	<p>Равномерное распределение</p> <p>Функция плотности вероятности:</p> $f_x = \frac{1}{b-a}, a \leq x \leq b; a = 0; b = 40 \text{ мс.}$
Размер пакета S	<p>Распределение Фишера – Типпетта (распределение экстремальных значений)</p> <p>Функция плотности вероятности:</p> $f_x = \frac{1}{b} e^{-\frac{x-a}{b}} e^{-e^{-\frac{x-a}{b}}}; a = 120 \text{ байт}; b = 36.$ <p>Значения для этого распределения могут быть сгенерированы с помощью следующей процедуры:</p> $x = a - b \ln(-\ln y),$ <p>где y получен из равномерного распределения в диапазоне $[0,1]$. Поскольку размер пакета должен быть целым числом байт, в качестве фактического размера пакета используется наибольшее целое число меньше или равное x.</p>

Продолжение таблицы 2.6

<p>Время D между поступлениями пакетов</p>	<p>Распределение Фишера – Типпетта (распределение экстремальных значений) Функция плотности вероятности: $f_x = \frac{1}{b} e^{-\frac{x-a}{b}} e^{-e^{-\frac{x-a}{b}}}; a = 55 \text{ мс}; b = 6.$</p>
<p>Заголовок User Datagram Protocol (UDP)</p>	<p>Фиксированное значение 2 байт, добавляемое к размеру пакета для учета заголовка UDP после сжатия.</p>

2.2. Методы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования для 5G

2.2.1. Сигнал пробуждения пользовательского оборудования

Первый из недостатков DRX схемы приема, описанных выше в Параграфе 1.4.2, обуславливается тем, что в NR Release-15 UE пробуждается, т.е. включает электрическую схему приемника, в начале каждого DRX цикла. Таким образом, когда ни один пакет не доступен для определенного UE, тратится энергия на включение электрической схемы радиоприемника, мониторинг контрольной информации в течение On duration, и на переход UE в режим сна, т.е. выключение электрической схемы радиоприемника. Такие ситуации возникают часто в случае разреженного трафика.

Для устранения данного недостатка в патенте [40] было предложено использовать сигнал пробуждения (wake-up signal, WUS) UE, который передается от базовой станции каждому UE перед циклом DRX и сообщает об отсутствии/наличии доступного пакета для определенного UE. Таким образом,

данный сигнал указывает – нужно ли UE переходить в активный режим и, следовательно, позволяет UE пропускать On duration в DRX циклах, когда BS не имеет пакета для этого UE. Также сигнал пробуждения позволяет избегать лишнего потребления энергии для переходов из спящего режима в активное состояние перед On duration и переходов из активного состояния в спящий режим после On duration, т.е. включения и выключения электрической схемы радиоприемника, соответственно.

На рисунке 2.3 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.

Таким образом, приблизительная формула выигрыша в энергосбережении UE за счет использования сигнала пробуждения UE может быть записана как:

$$G_{WUS} = N_{DRX_0} \cdot D_{On\ duration} \cdot E_{PDCCH} - N_{DRX} \cdot E_{WUS}, \quad (2.1)$$

где G_{WUS} – выигрыш в энергосбережении за счет использования сигнала пробуждения UE; N_{DRX_0} – количество циклов DRX, перед началом которых на BS отсутствует пакет для UE; $D_{On\ duration}$ – длительность таймера On duration в слотах; E_{PDCCH} – энергия, затрачиваемая пользователем на мониторинг контрольной информации о планировании передачи в канале Physical Downlink Control Channel (PDCCH); N_{DRX} – общее количество циклов DRX; E_{WUS} – общая энергия, затрачиваемая пользователем на прием и обработку сигнала пробуждения.

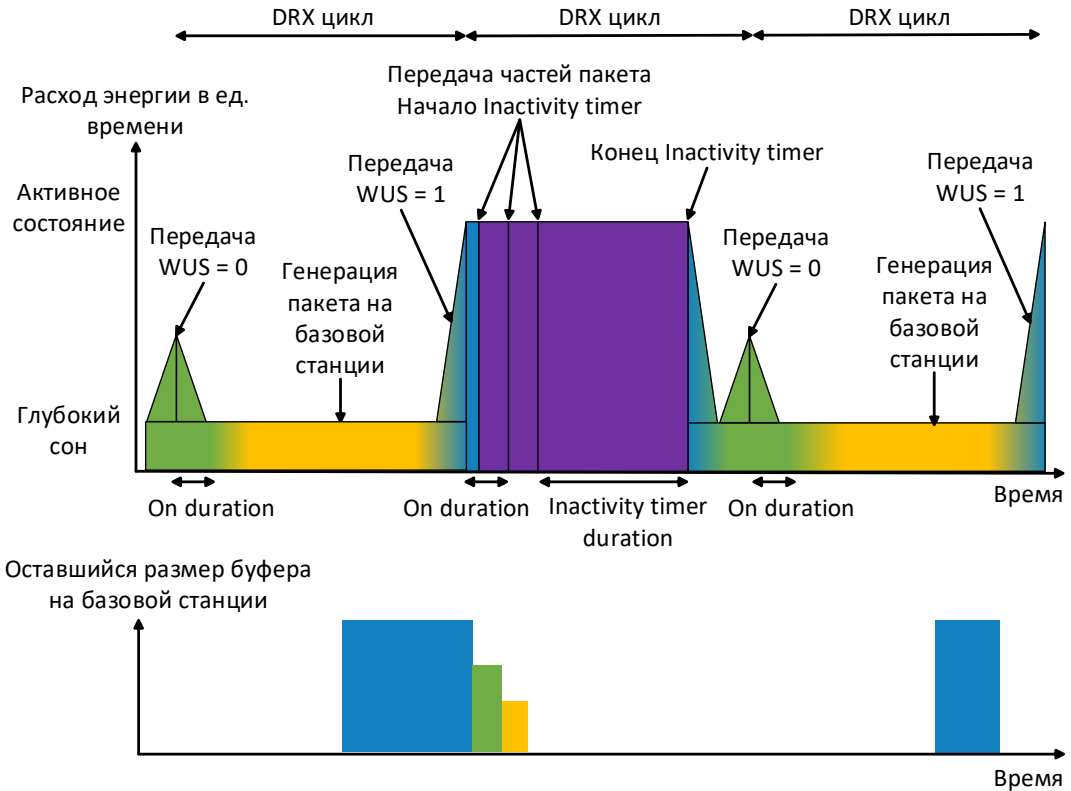


Рисунок 2.3 – Распределение расхода энергии по времени при использовании сигнала пробуждения UE

2.2.2. Сигнал перехода пользовательского оборудования в режим сна

Основным слабым местом схемы прерывистого приема является активация таймера Inactivity после передачи последнего пакета, т.е. когда на базовой станции больше нет данных для передачи на пользовательское оборудование. Данный недостаток оказывает большее негативное воздействие на энергоэффективность пользовательского оборудования по причине относительно большей длительности Inactivity timer по сравнению с таймером On duration. Например, для стандартных параметров модели трафика FTP 3 оптимальная (с точки зрения сохранения задержки передачи данных) конфигурация DRX цикла включает в себя таймер On duration равный 8 мс и Inactivity timer равный 100 мс.

Для решения данной проблемы в патенте [41] было предложено ввести в стандарт NR сигнал перехода UE в режим сна (go-to-sleep) на физическом уровне.

Использование данного сигнала можно считать улучшенным вариантом сигнала перехода в режим сна, передаваемым от базовой станции пользователю в стандарте LTE на MAC уровне, который сигнализирует UE перейти в режим сна до следующего цикла DRX. Таким образом в стандарте LTE, после передачи последней части пакета пользователь может избежать лишней траты энергии на мониторинг контрольной информации в PDCCH канале в течение Inactivity timer, перейдя в режим сна до следующего цикла DRX. Однако, у данного сигнала в стандарте LTE можно выделить два недостатка:

1. Данный сигнал перехода UE в режим сна передавался в специальной области заголовка пакета контрольного элемента (Control element, CE) на MAC уровне, что давало задержку порядка 10 мс перед уходом в сон. Кроме самого эффекта запаздывания перехода в режим сна недостатком такой задержки являлась невозможность использования данного сигнала в течение таймера On duration, так как большая часть конфигураций длины таймера On duration меньше 10 мс.
2. Вторым недостатком MAC CE go-to-sleep сигнала предыдущего поколения являлась ограниченность в его функциональности, так как он мог сигнализировать перейти в режим сна лишь до следующего цикла DRX, т.е. отменить оставшуюся часть текущего цикла DRX. Таким образом, пользователь пропускал таймер Inactivity полностью и мог пропустить момент прихода нового пакета на BS. В таблице 2.7 показано, что для некоторых моделей трафика, вероятность генерации нового пакета в течение таймера Inactivity достаточно велика.

Предложенный в [41] и в настоящей работе новый тип go-to-sleep сигнала 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 нового типа 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 2.4), или пока не появится новый пакет на BS (см. рисунок 2.5), 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 нового типа go-to-sleep сигнала позволяет использовать его в течение таймера On duration, когда на BS также нет пакетов для данного UE.

На рисунке 2.4 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, т.е. для второго цикла DRX из рисунка 1.2. Рисунок 2.5 иллюстрирует пример графика расхода энергии пользователем для случая с генерацией пакета на BS во время таймера Inactivity.

Таблица 2.7 – Вероятность генерации нового пакета в течение таймера Inactivity

Модель трафика	Вероятность генерации нового пакета в течение таймера Inactivity, %
FTP model 3	41,76
Instant messaging	4,65
VoIP	67,69
Gaming	9,09
Web browsing	15,88
Video streaming	68,44

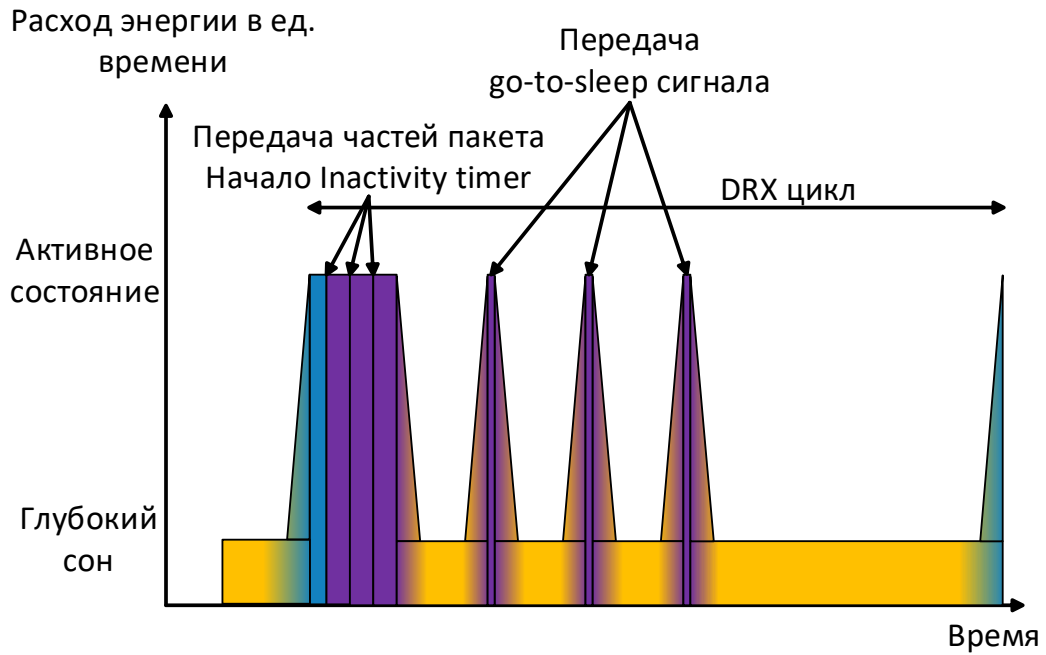


Рисунок 2.4 – Пример работы сигнала перехода в режим сна в случае отсутствия генерации нового пакета в течение таймера Inactivity

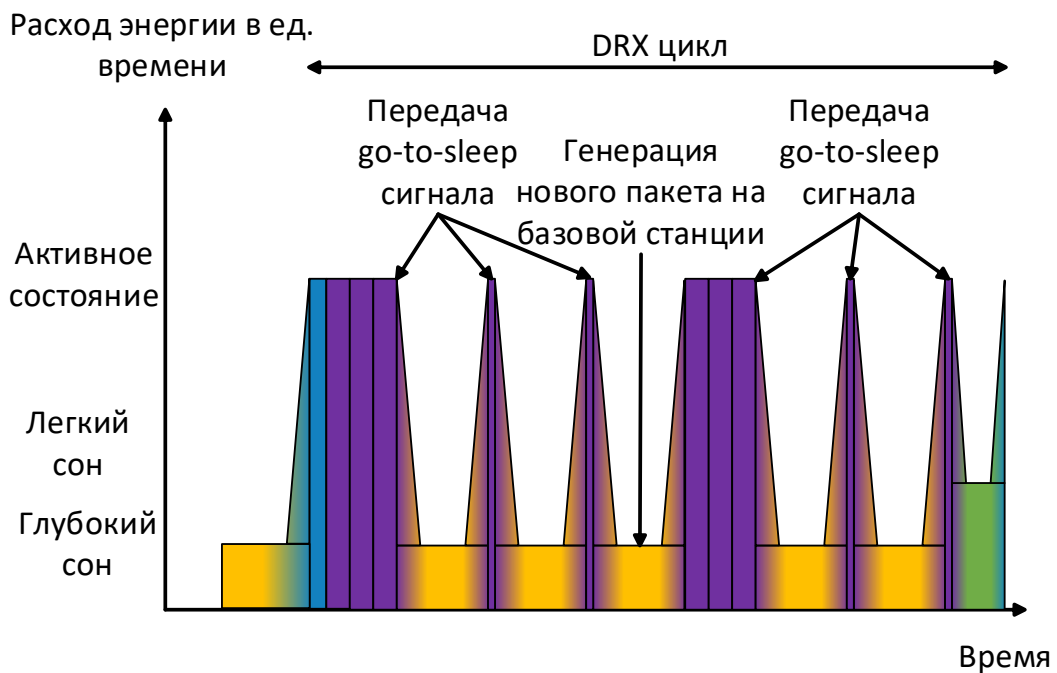


Рисунок 2.5 – Пример работы сигнала перехода в режим сна в случае генерации нового пакета в течение таймера Inactivity

2.2.3. Межслотовое планирование передачи и адаптация конфигурации антенной решетки

Межслотовое планирование передачи

При рассмотрении методов улучшения энергосбережения пользовательского оборудования для 5G можно отдельно выделить две схемы, которые объединяет то, что с технической точки зрения, их реализация поддерживается системами связи стандарта NR, начиная с первого релиза NR Release-15, т.к. для их использования не нужно внедрение дополнительных сигналов ни на физическом, ни на более высоких уровнях. Но эти схемы не были рассмотрены с точки зрения использования их для улучшения энергосбережения пользовательского оборудования.

Системы связи стандарта NR поддерживают планирование данных на более поздний слот времени, чем тот, в котором была получена контрольная информация, что отличает их от систем беспроводной связи стандарта LTE, где контрольная информация передается перед данными в одном и том же слоте.

С точки зрения энергосбережения, межслотовое планирование передачи (cross-slot scheduling) позволяет UE переходить в режим микросна до конца слота после получения контрольной информации в его начале. Таким образом, UE не нужно тратить энергию на прием в течение оставшейся части слота. Использование данной схемы для дополнительного энергосбережения UE в системах связи 5G было предложено в патенте [42].

Адаптация конфигурации антенной решетки

Второй естественной схемой энергосбережения UE является использование различных конфигураций антенной решетки UE при приеме контрольной информации и приеме данных путем выключения части принимающих элементов во время мониторинга контрольной информации и последующим её включением после успешного получения контрольной о запланированной передаче данных от

BS. Это может обеспечить заметный выигрыш в снижении энергопотребления с небольшим влиянием на задержку передачи данных и пропускную способность системы связи, например, в следующих случаях:

1. Когда пакет передаваемых данных очень мал. В таком случае, более высокое отношение мощности сигнала к мощности шума (ОСШ), т.е. дополнительное усиление мощности передачи за счет большего количества антенн, не требуется для доставки пользователю целого пакета, используя одну передачу.
2. Состояние канала достаточно хорошее, следовательно, дополнительное усиление мощности передачи, создаваемое за счет большего количества антенн при построении диаграммы направленности, не обеспечивает видимого увеличения пропускной способности.
3. Низкая загруженность трафика данных. Такой случай представляет собой комбинацию случаев 1 и 2, т.е. относительно малый размер пакета данных и относительно большое ОСШ за счет отсутствия коллизий между UE и из-за большого среднего времени чтения пакета данных.

2.3. Результаты компьютерного моделирования

Эффективность и выигрыш от использования предложенных схем энергосбережения [43, 44] пользовательского оборудования для систем беспроводной связи 5G были проверены путем компьютерного моделирования на системном уровне, как было описано в Параграфе 2.1. Моделирование нисходящего канала связи (downlink, DL) проводилось для Urban Macro сценария для частотного диапазона 1 (frequency region 1, FR1 [45]). 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) [46].

Параметры моделирования представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Параметры моделирования на системном уровне

Параметр	Значение
Несущая частота	4 ГГц
Сценарий	Dense Urban Macro FR1 DL
Ширина полосы частот	100 МГц
Расстояние между поднесущими	30 кГц
Модель канала связи	IMT UMa A
Расстояние между BS	200 м
Антенная конфигурация BS ($M_g, N_g, M, N, P; M_p, N_p$)	(1,1,8,8,2; 2,8) 32 приемного/передающего элемента
Расстояние между антеннами BS (d_v, d_H) $\times\lambda$	(0,8; 0,5)
Антенная конфигурация UE ($M_g, N_g, M, N, P; M_p, N_p$)	(1,1,1,2,2; 1,2) 4 приемных/передающих элементов
Расстояние между антеннами UE (d_v, d_H) $\times\lambda$	(0,5; 0,5)
Конфигурация аналоговой диаграммы направленности BS	Одиарный луч в направлении 102° от оси ординат
Распределение UE	80% внутри помещения; 20% вне помещения
Наивысшая модуляция	256 QAM
Схема канального кодирования	LPDC из стандарта NR Release 15
Схема приема/передачи	Многопользовательская MIMO схема До 12 пространственных потоков на BS До 4 пространственных потоков на UE
Планировщик	Выбор пользователя, оптимального ранга (количества пространственных каналов передачи) и оптимальной конфигурации диаграммы направленности, используя многопользовательский алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания
Схема обратной связи	Type II CSI

Для моделирования потребляемой энергии пользователем были определены типы временных слотов в зависимости от операции [47], которую пользователь производит в определенном слоте, или, другими словами, в зависимости от состояния, в котором пользователь находится в определенном слоте. Модель потребляемой энергии пользователем для каждого состояния представлена в таблице 2.9. Значения потребляемой энергии за временной слот в данной модели представлены в условных единицах после нормировки на энергию, потребляемую в режиме глубокого сна. Таким образом, потребляемая энергия за временной слот в течение режима глубокого сна равна единице.

Таблица 2.9 – Модель потребляемой энергии пользователем

Состояние пользовательского оборудования	Потребляемая энергия за временной слот, в усл. ед.
Активное состояние (мониторинг контрольной информации)	100
Прием пользователем данных (части пакета)	300
Режим микросна	45
Режим легкого сна	20
Переход в легкий сон	100
Режим глубокого сна	1
Переход в глубокий сон	450
Обработка сигнала пробуждения UE	100

При моделировании на системном уровне, как и в реальном сценарии развертывания систем связи, пользователи могут находиться в разных условиях, определяемых:

- 1) загруженностью базовых станций соседних сот, это определяет уровень межсотовой интерференции (Inter-Cell Interference, ICI) и, следовательно,

отношение мощности сигнала к общей мощности шума и помехи (отношение сигнала помеха шум, ОСПШ, signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) на приемнике UE.

- 2) расстоянием между UE и обслуживающей BS по причине квадратичной зависимости в свободном пространстве потерь мощности сигнала от расстояния между источником и приёмником. Также более удаленные от обслуживающей базовой станции пользователи оказываются ближе к базовым станциям соседних сот, что также увеличивает уровень межсотовой интерференции.
- 3) расположением UE внутри или вне помещения. Для пользовательского оборудования, расположенного внутри помещения, значительное ослабление SINR принятого сигнала вызвано потерями при прохождении сигнала внутрь помещения (penetration loss).

По указанным причинам результаты моделирования энергоэффективности схемы DRX далее представлены отдельно для трех групп пользователей, для которых SINR соответствует 5%, 50% и 95% уровням интегральной функции распределения SINR, представленной на рисунке 2.6. На данном рисунке показана полученная путем имитационного моделирования рассматриваемой системы связи интегральная функция распределения, так называемого, геометрического SINR, при вычислении которого в мощности принятого сигнала не учитывается усиление диаграмм направленности антенных решеток базовой станции и пользовательского оборудования.

При моделировании для различных моделей трафика, описанных в Параграфе 1.1.2, использовались определенные оптимизированные конфигурации [47] схемы прерывистого приема, представленные в таблице 2.10, определяющие длительности разных состояний пользовательского оборудования согласно схеме DRX.

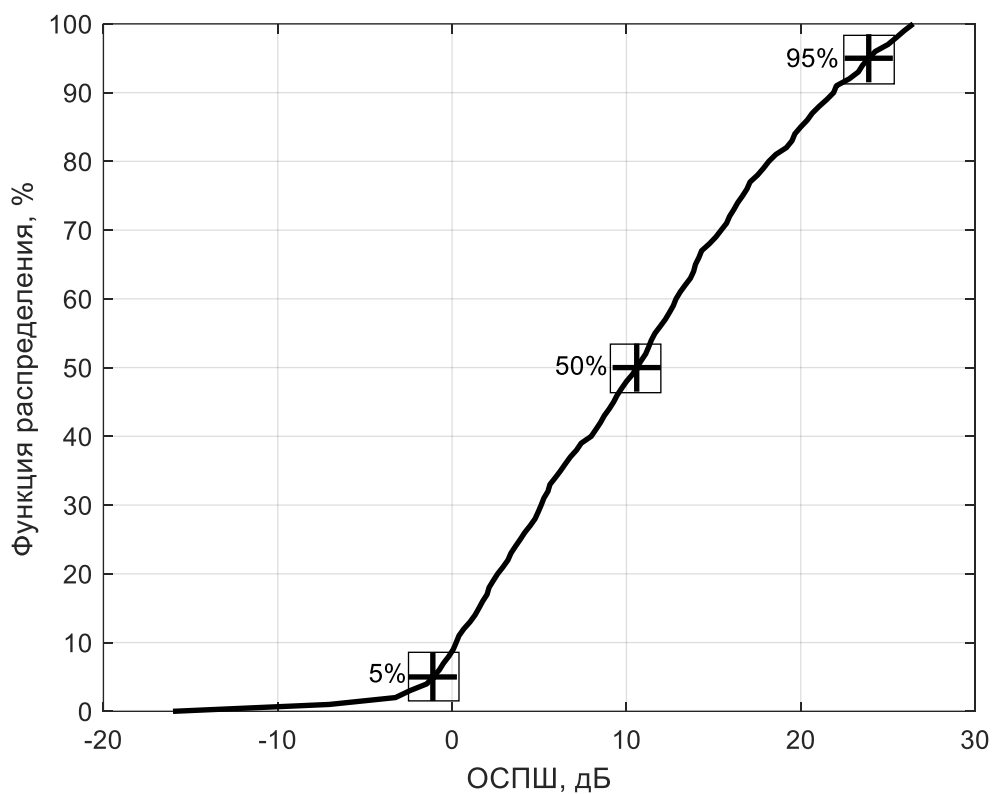


Рисунок 2.6 – Интегральная функция распределения SINR

Таблица 2.10 – Конфигурации DRX схемы для различных моделей трафика

Модель трафика	Длительность		
	DRX цикл	Inactivity timer	On duration
FTP model 3	160	100	8
Instant Messaging	320	80	10
VoIP	40	10	4
Gaming	40	10	4
Web browsing	320	80	10
Video streaming	40	10	4

2.3.1. Анализ эффективности схемы прерывистого приема

В данном параграфе представлен анализ DRX схемы, описанный также в [48].

В таблице 2.11 приведены результаты компьютерного моделирования системы беспроводной мобильной связи пятого поколения на системном уровне для всех представленных моделей трафика.

Полученный путем имитирования работы системы связи выигрыш в энергосбережении пользовательского оборудования за счет использования схемы прерывистого приема DRX представлен для трех основных точек интегральной функции распределения SINR (см. рисунок 2.6). Выигрыш рассчитывается в процентном отношении и равен уменьшению среднего значения потребляемой энергии в единицу времени при использовании схемы DRX по сравнению с конфигурацией работы UE без использования схемы DRX, т.е. по сравнению с UE, находящимся постоянно в активном состоянии.

Таблица 2.11 – Результаты компьютерного моделирования схемы DRX

SINR	Выигрыш в энергосбережении, %					
	FTP3	IM	VoIP	Gaming	Web browsing	Video streaming
5%	51	92	71	65	95	57
50%	55	92	71	65	95	57
95%	56	92	71	65	95	58

Для проведения более детального анализа энергоэффективности системы в дополнение к параметрам каждой модели трафика и конфигурации DRX цикла целесообразно использовать информацию о загруженности частотно-временных ресурсов на базовой станции при моделировании различных моделей трафика, что позволяет оценить верхнюю границу возможного сокращения потребляемой UE энергии. Эта оценка может быть получена путем нахождения среднего процента неиспользованных частотно-временных ресурсов системы связи без применения

схемы прерывистого приема DRX. В таблице 2.12 представлены доли использованных (строка 1) и неиспользованных ресурсов (строка 2) на базовой станции для всех анализируемых в данной работе моделей трафика. В третьей строке таблицы приведена оценка возможного дополнительного сокращения потребляемой UE энергии, не достигаемое схемой DRX. Значения оценки получены для UE с медианным (50%) уровнем SINR путем вычитания из среднего процента неиспользованных частотно-временных ресурсов (строка 2 таблицы 2.12) достигаемого выигрыша в энергосбережении при использовании DRX схемы (см. строку 2 таблицы 2.11).

Таблица 2.12 – Загруженность ресурсов на базовой станции

	FTP3	IM	VoIP	Gaming	Web browsing	Video streaming
Загруженность ресурсов на базовой станции, RU, %	28	1	3,5	11	< 1	28
Средняя доля неиспользованных частотно-временных ресурсов, %	72	99	96,5	89	>99	72
Сокращение потребляемой UE энергии, не достигаемое схемой DRX, %	~16	~7	~26	~24	~5	~14

Возможное сокращение потребляемой UE энергии, не достигаемое схемой DRX и приведенное в строке 3 таблицы 2.12, обусловлено неоптимальным распределением интервалов времени в DRX цикле (см. рисунок 1.2), и связано в основном с интервалами в режиме активного состояния UE мобильного

устройства, когда на базовой станции отсутствуют пакеты для этого пользовательского оборудования.

2.3.2. Анализ эффективности сигнала перехода пользовательского оборудования в режим сна

В этом разделе представлены результаты моделирования на системном уровне для сигнала перехода в режим сна для различных моделей трафика.

В таблице 2.13 представлены конфигурации сигнала перехода в режим сна для различных моделей трафика.

Таблица 2.13 – Конфигурации сигнала перехода в режим сна

Модель трафика	Длительность режима сна на UE после получения сигнала перехода в режим сна, мс
FTP model 3	40
Instant messaging	
Web browsing	
VoIP	10
Gaming	
Video streaming	

Модель трафика FTP 3

Для модели трафика FTP 3 (File Transfer Protocol model 3) результаты представлены для расширенного набора конфигураций для изучения эффективности сокращения энергии, потребляемой пользовательским оборудованием, при использовании сигнала перехода в режим сна при различной загрузке частотно-временных ресурсов сети связи. Конфигурации представлены в таблице 2.14.

На рисунке 2.7 показан выигрыш в энергосбережении UE при использовании нового сигнала перехода UE в режим сна для базовой конфигурации модели трафика FTP 3. Как видно из данного рисунка, новый go-to-sleep (GTS) сигнал с длительностью в режиме сна равной 40 мс обеспечивает значительный выигрыш в энергопотреблении по сравнению с конфигурацией схемы прерывистого приема без использования сигнала перехода UE в режим сна для всех трех типов UE из интегральной функции распределения SINR.

Таблица 2.14 – Дополнительные конфигурации модели трафика FTP 3

Конфигурация модели трафика FTP 3	Размер пакета S, Мбайт	Время чтения D, мс
Базовая	0,5	200
Низкая загруженность (16%)	0,1	80
Средняя загруженность (33%)		40
Высокая загруженность (63%)		20

На рисунке 2.8 представлены результаты сравнения временной задержки и средней скорости передачи данных для конфигураций с использованием и без использования нового GTS сигнала перехода в режим сна. Можно заметить, что значительный выигрыш в энергосбережении (см. рисунок 2.7) приводит к некоторому увеличению задержки и снижению средней скорости передачи пакета. В то же время стоит учесть, что для модели трафика FTP 3 использовалась максимально допустимая длительность пребывания UE в режиме сна равная 40 мс после приема сигнала GTS, т.е. представленные потери в задержке и пропускной способности UE являются максимальными для модели трафика FTP 3.

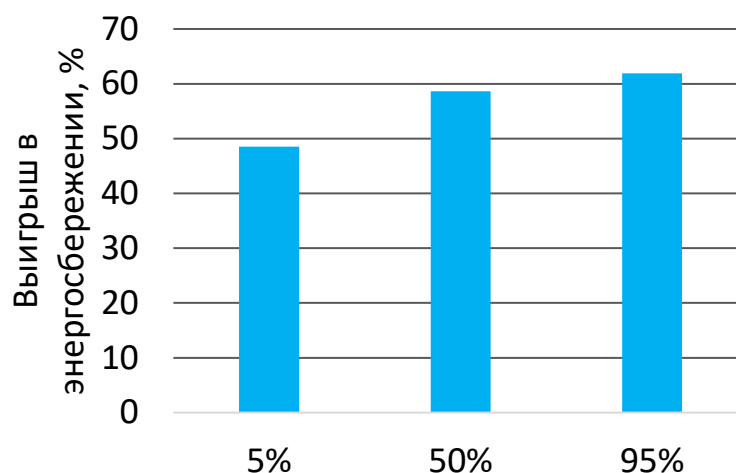


Рисунок 2.7 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для FTP model 3

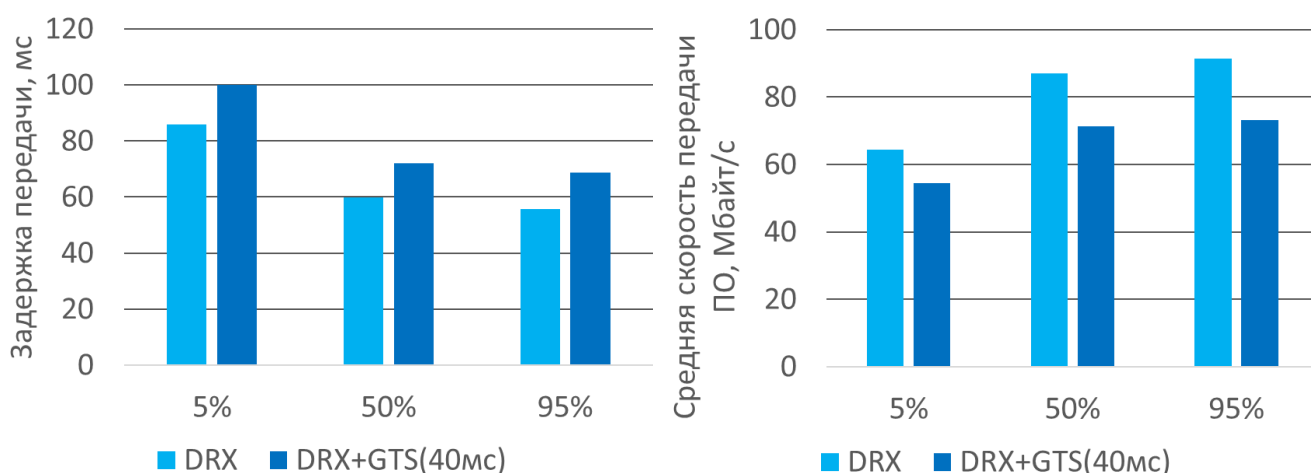


Рисунок 2.8 – Сравнение задержки и средней скорости передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна

На рисунке 2.9 показаны сравнения энергоэффективности схемы DRX при использовании сигнала GTS для трех групп пользователей с различными SINR относительно конфигурации со схемой DRX без использования сигнала GTS для различных значений параметров модели трафика FTP 3 (см. таблицу 2.14), обеспечивающих низкую (конфигурация 1), среднюю (конфигурация 2) и высокую (конфигурация 3) загрузку частотно-временных ресурсов сети связи.

Как видно из приведенных на рисунке 2.9 данных, дополнительный выигрыш в снижении энергопотребления при использовании GTS сигнала при низкой нагрузке может достигать 76%. Также, GTS обеспечивает значительный выигрыш

относительно схемы DRX в случаях средней и высокой загрузки, 64-74% и 39-58%, соответственно. Однако эти значения меньше значений, наблюдаемых в случае низкой нагрузки. Это связано с тем, что сигнал GTS дает наибольший выигрыш в энергосбережении в ситуациях, когда существует лишь небольшая вероятность того, что новый пакет будет сгенерирован во время следующего таймера Inactivity. В таком случае, таймер Inactivity намного дольше, чем необходимая продолжительность приема пакетов, и сигнал GTS обеспечивает пропуск большей части активного периода. В случае средних и высоких загрузок системы связи существует более высокая вероятность того, что произойдет генерация нового пакета для UE во время таймера Inactivity, поэтому часть активного периода, занимаемая приемом пакетов, увеличивается, и соответственно уменьшается возможность улучшения энергосбережения за счет использования сигнала GTS по сравнению со случаем низкой нагрузки.

Также, из рисунка 2.9 можно увидеть, что использование сигнала GTS обеспечивает большее снижение энергопотребления для UE в центре ячейки (соты) сотовой связи (95% - я группа UE SINR), особенно в случае высокой нагрузки на трафик. Такая зависимость может быть объяснена увеличенной задержкой передачи пакетов для UE на границе соты (5% - я группа UE SINR) по сравнению с задержкой для UE в центре соты. Меньшая задержка передачи для UE в центре ячейки приводит к более быстрому началу использования сигнала GTS и, таким образом, к более высокому снижению энергопотребления. Как показано в таблице 2.14, разница в выигрыше энергосбережения между рассматриваемыми группами UE составляет около 7% при низкой нагрузке системы (Конфигурация 1), но она увеличивается до 19% при высокой нагрузке (Конфигурация 3). Проведенный дополнительный анализ показал, что причиной этого является большее увеличение задержки передачи данных, вызванное увеличением загрузки сети, для UE на границе ячейки, чем в её центре. Сравнение длительности передачи пакета с использованием и без использования сигнала GTS для дополнительных конфигураций модели FTP 3 приведено на рисунке 2.10.

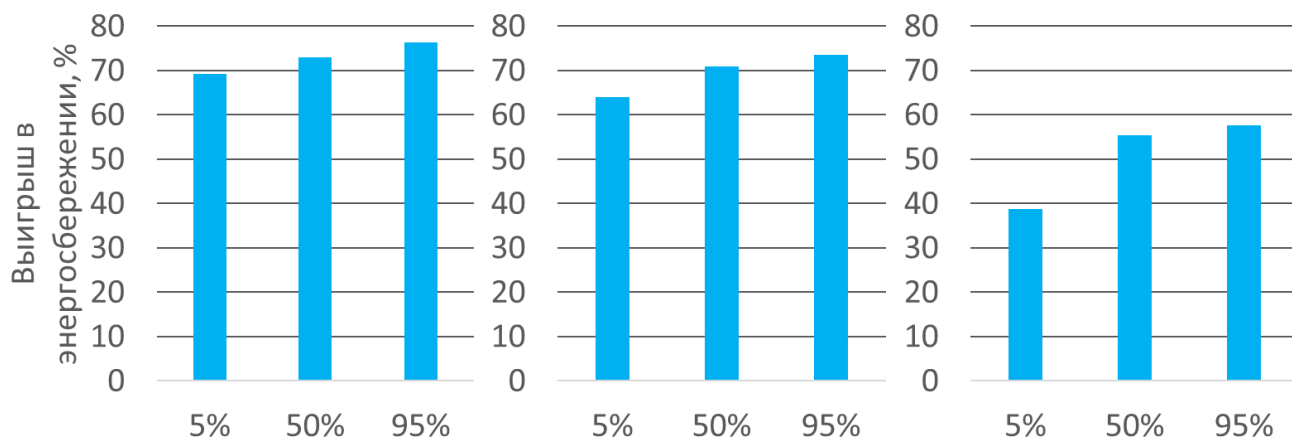


Рисунок 2.9 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для конфигураций модели трафика FTP 3 с различной загрузкой

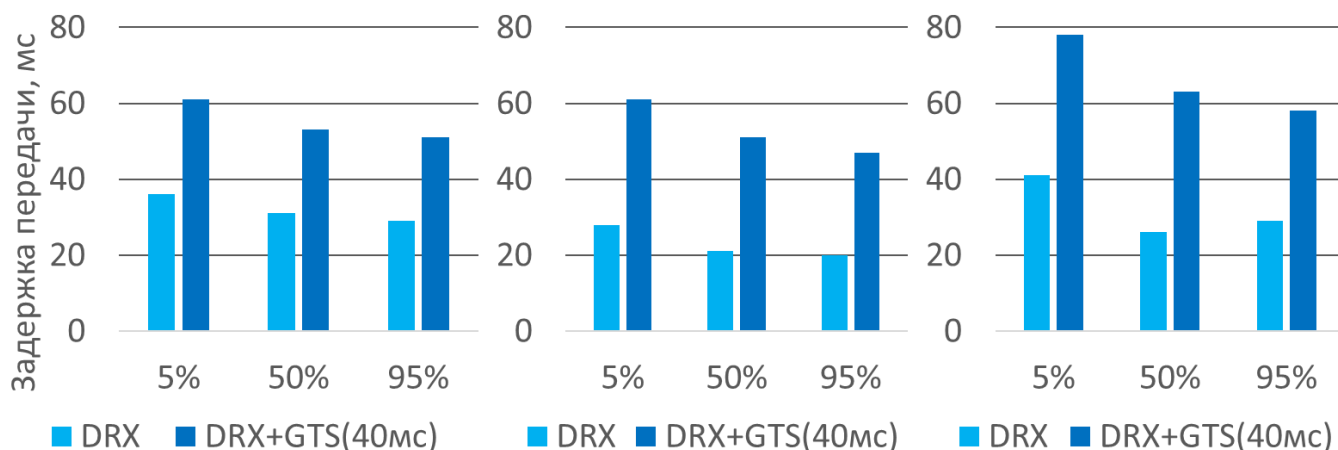


Рисунок 2.10 – Сравнение задержки передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна для конфигураций модели трафика FTP 3 с различной загрузкой

Модель трафика обмена мгновенными сообщениями

Как обсуждалось выше, в случае низкой загрузки системы связи пользовательское оборудование (UE) в основном находится в режиме сна, поэтому каждый период в активном состоянии заметно влияет на общее энергопотребление. Передача данных в модели трафика мгновенных сообщений (Instant messaging, IM) создает очень низкую загруженность частотно-временных ресурсов сети. В этом случае использование сигнала GTS обеспечивает возможность пропустить большую часть активного периода, и тем самым, позволяет достичь более 67%

выигрыша в энергопотреблении по сравнению со схемой DRX, как показано на рисунке 2.11.

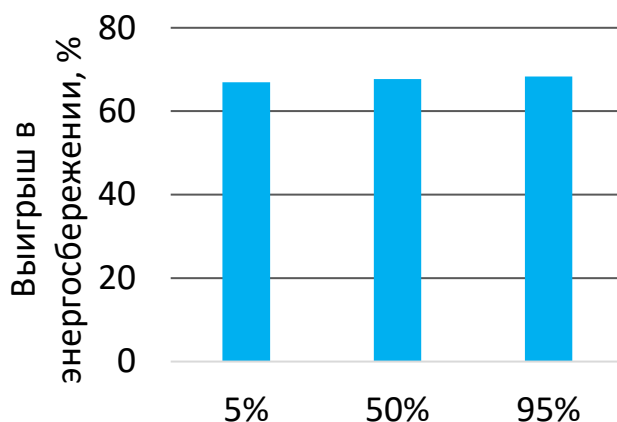


Рисунок 2.11 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для модели трафика мгновенных сообщений

На рисунке 2.12 также представлены результаты сравнения задержки и средней скорости передачи данных для конфигураций с использованием и без использования сигнала GTS.

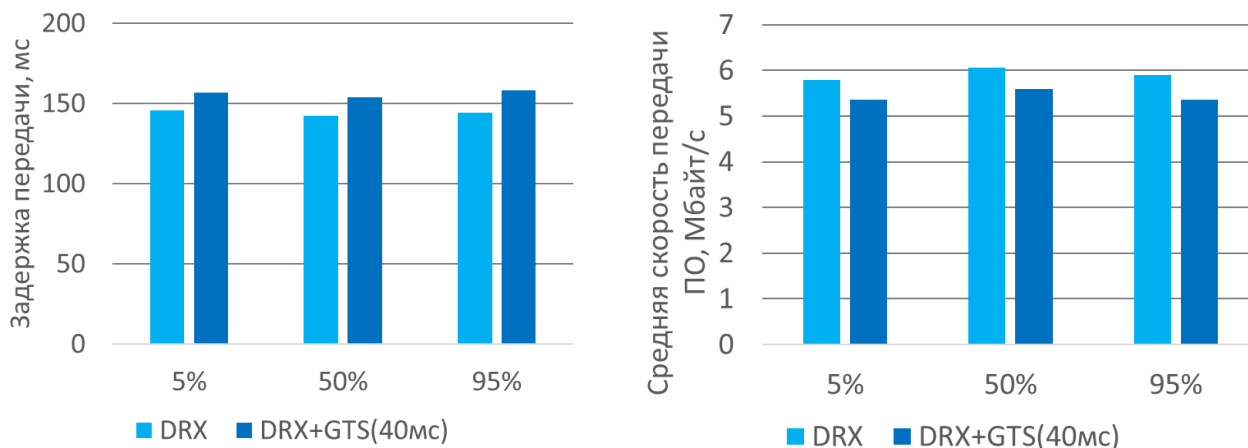


Рисунок 2.12 – Сравнение задержки и средней скорости передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна

Модель трафика передачи голоса по протоколу IP

Как было описано в Параграфе 1.1.2, у UE в модели трафика передачи голоса по протоколу IP (Voice over Internet Protocol, VoIP) существуют два состояния: активное и неактивное. В течение активного периода UE получает новый пакет

после каждого кадра кодера длительностью $T = 20$ мс. Размеры пакетов составляют около 40 байт, что относительно мало даже по сравнению с пакетами в модели трафика обмена мгновенными сообщениями. Исходя из конфигурации схемы прерывистого приема, UE тратит мало времени в каждом цикле DRX на получение двух небольших пакетов за 40 мс цикла DRX. Как обсуждалось выше, в таких сценариях, т.е. при низкой загрузке частотно-временных ресурсов, сигнал GTS обеспечивает максимальный выигрыш в снижении энергопотребления UE.

С другой стороны, в неактивном состоянии UE получает один пакет только каждые четыре цикла DRX. Таким образом, использование базовой схемы DRX уже обеспечивает значительное преимущество по сравнению с конфигурацией без использования схемы прерывистого приема, т.е. в неактивном состоянии выигрыш за счет использования сигнала GTS не может быть большим.

Как видно из рисунка 2.13, в целом для модели трафика VoIP использование сигнала GTS обеспечивает значительный выигрыш в снижении энергопотребления – 60%. Также на рисунке 2.14 представлены результаты сравнения временной задержки и средней скорости передачи данных при использовании и без использования сигнала GTS для модели голосового трафика по протоколу IP.

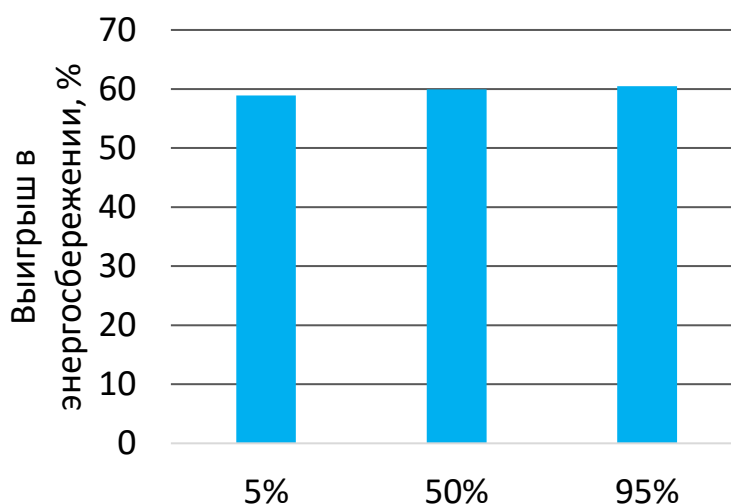


Рисунок 2.13 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для модели трафика VoIP

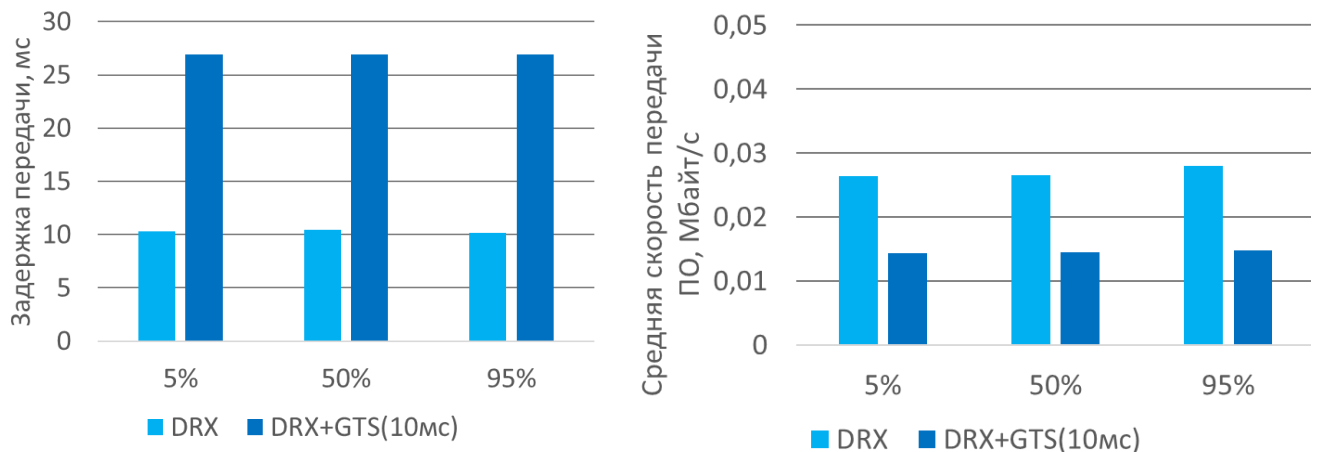


Рисунок 2.14 – Сравнение задержки и средней скорости передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна

Модель игрового трафика

Распределение пакетов во времени для UE в модели игрового трафика очень похоже на распределение пакетов UE в активном состоянии в модели трафика VoIP. Единственное количественное различие заключается только в среднем количестве поступающих пакетов за один цикл DRX продолжительностью 40 мс – два пакета для VoIP против одного пакета для модели игрового трафика. Такое различие еще больше увеличивает количество временных слотов активного состояния, которые пропускаются за счет использования сигнала GTS. Как видно из рисунка 2.15, сигнал GTS обеспечивает выигрыш в снижении энергопотребления UE примерно на 68% для модели игрового трафика. Также на рисунке 2.16 представлены результаты сравнения временной задержки и средней скорости передачи данных с использованием и без использования сигнала GTS для модели игрового трафика.

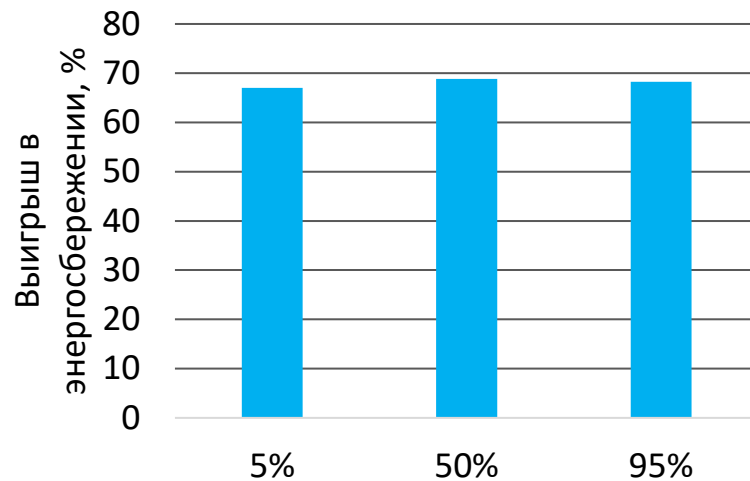


Рисунок 2.15 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для модели игрового трафика

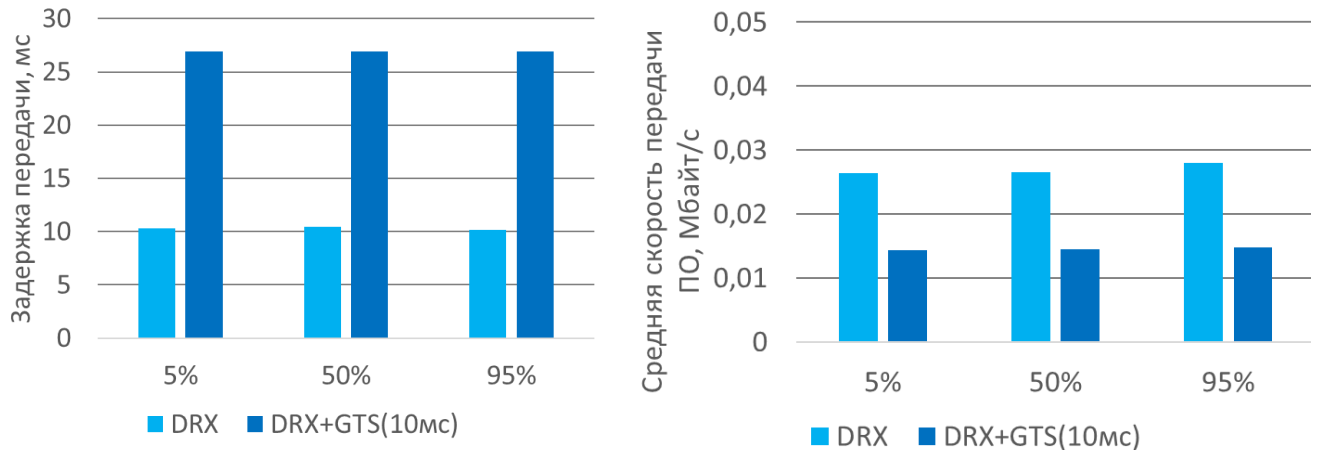


Рисунок 2.16 – Сравнение задержки и средней скорости передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна

Модель трафика просмотра веб-страниц

Согласно описанию в Параграфе 1.1.2, передача данных в модели трафика просмотра веб-страниц (Web-browsing) в среднем приводит к значительно меньшему, примерно в 10 раз, использованию частотно-временных ресурсов, чем в случае обмена мгновенными сообщениями. Это связано с тем, что для такого типа трафика среднее время прибытия пакетов составляет порядка 30 сек. Однако размеры пакетов в модели трафика просмотра веб-страниц намного больше, поэтому UE тратит большую часть активного периода на прием пакета. Таким

образом, выигрыш в энергопотреблении для данной модели трафика должен быть сопоставим с таковым для модели трафика мгновенных сообщений. Как видно из рисунка 2.17, снижение энергопотребления для модели трафика просмотра веб-страниц при использовании сигнала GTS равно примерно 60%. Также на рисунке 2.18 представлены результаты сравнения временной задержки и средней скорости передачи данных с использованием и без использования сигнала GTS для модели трафика просмотра веб-страниц.

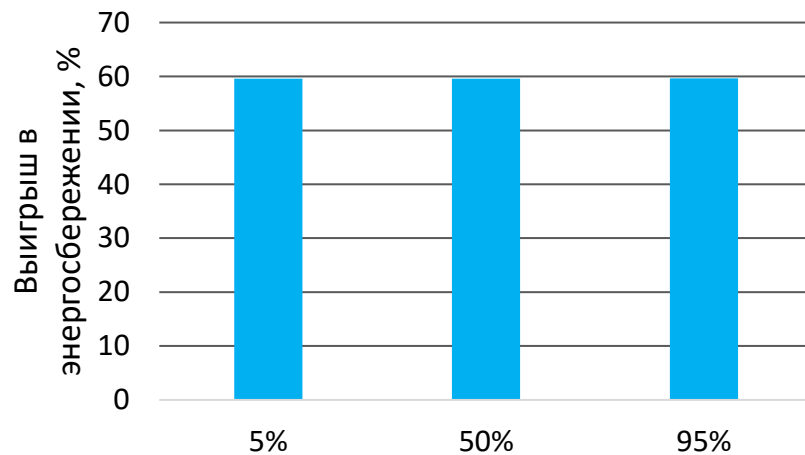


Рисунок 2.17 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для модели трафика просмотра веб-страниц

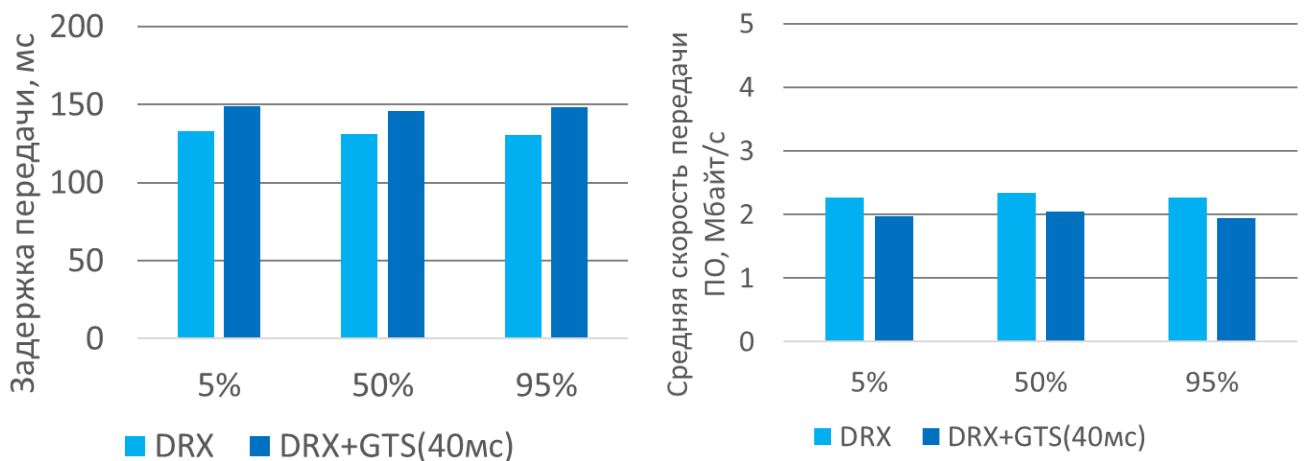


Рисунок 2.18 – Сравнение задержки и средней скорости передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна

Модель трафика потокового видео

При моделировании трафика потокового видео группа из восьми пакетов поступает каждые 100 мс. Средний размер таких фрагментов равен 10 байт, поэтому общий их размер невелик. Следовательно, UE не требуется много времени для приема всей группы пакетов в начале цикла DRX. Таким образом, использование сигнала GTS позволяет пропустить большую часть активных слотов.

На рисунке 2.19 представлены значения выигрыша в снижении энергопотребления за счет использования сигнала GTS перехода UE в режим сна для модели трафика потокового видео. Как видно из приведенных на данном рисунке данных, использование сигнала GTS обеспечивает выигрыш в энергоэффективности минимум 70%. Также на рисунке 2.20 представлены результаты сравнения временной задержки и средней скорости передачи данных с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна для модели трафика потокового видео.

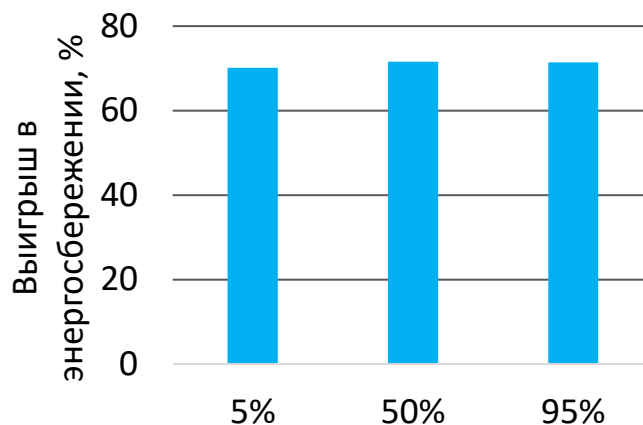


Рисунок 2.19 – Выигрыш GTS в энергосбережении UE для модели трафика потокового видео

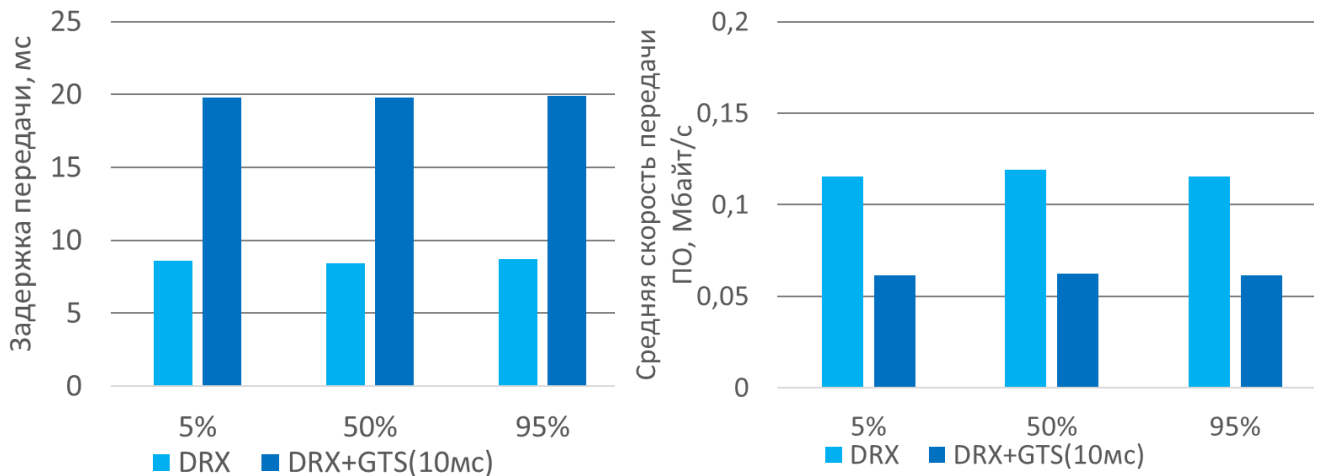


Рисунок 2.20 – Сравнение задержки и средней скорости передачи для конфигураций с использованием и без использования сигнала перехода в режим сна

2.3.3. Анализ эффективности сигнала пробуждения пользовательского оборудования

Оптимизация затрат энергии на мониторинг WUS

Чтобы проверить, с каким значением передан сигнал пробуждения UE (wake-up signal, WUS), т.е. нужно ли UE переходить в активный режим и включать таймер On duration, UE должен перейти в специальный активный режим для мониторинга и обработки сигнала WUS перед каждым циклом DRX. Если пакета на BS нет, то передается WUS со значением 0, и в таком случае, UE переходит в состояние сна, т.е. пропускает один цикл DRX. В таком случае использование сигналов WUS позволяет сократить количество потребляемой UE энергии за счет пропуска On duration, но в то же время UE вынужденно тратит дополнительную энергию на мониторинг и обработку этих сигналов.

Чтобы уменьшить накладные расходы на мониторинг и обработку WUS, в патенте [49] было предложено объединить их с периодической операцией синхронизации UE, т.е. проводить операцию обработки сигнала WUS и сигнала синхронизации в течение общего активного периода. Для осуществления данного

объединения вместо блока синхронизационных сигналов (synchronization signal block, SSB) было предложено использовать для синхронизации передачу опорного сигнала информации о состоянии канала (channel state information reference signal, CSI RS), что также поддерживается стандартом NR систем связи 5G. Таким образом, при определенной конфигурации периодов передачи сигналов WUS и CSI RS возможна одновременная их передача перед началом цикла DRX, следовательно, для выполнения обеих процедур, синхронизации UE и мониторинга сигнала WUS, требуется только один активный период.

На рисунке 2.21 показано сравнение выигрышей в энергопотреблении за счет использования сигнала WUS для модели трафика FTP 3 и трех конфигураций сигнала, используемого для синхронизации:

1. Для синхронизации используется сигнал SSB. В таком случае нельзя объединить операции синхронизации и мониторинга WUS.
2. Для синхронизации используются периодические сигналы CSI RS.
3. Для синхронизации используются аperiodические CSI RS. В такой конфигурации UE может пропустить обработку CSI RS, если получен нулевой бит в сигнале WUS.

Из гистограмм, приведенных на рисунке 2.21, видно, что использование для синхронизации аperiodических сигналов CSI RS позволяет получить существенное увеличение выигрыша (в 2-3 раза) в энергосбережении по сравнению с использованием сигналов SSB. Таким образом, при использовании сигналов пробуждения WUS для синхронизации предпочтительно использовать аperiodические CSI RS.

Далее, при анализе эффективности в энергосбережении UE сигнала пробуждения, не учитываются затраты UE на синхронизацию.

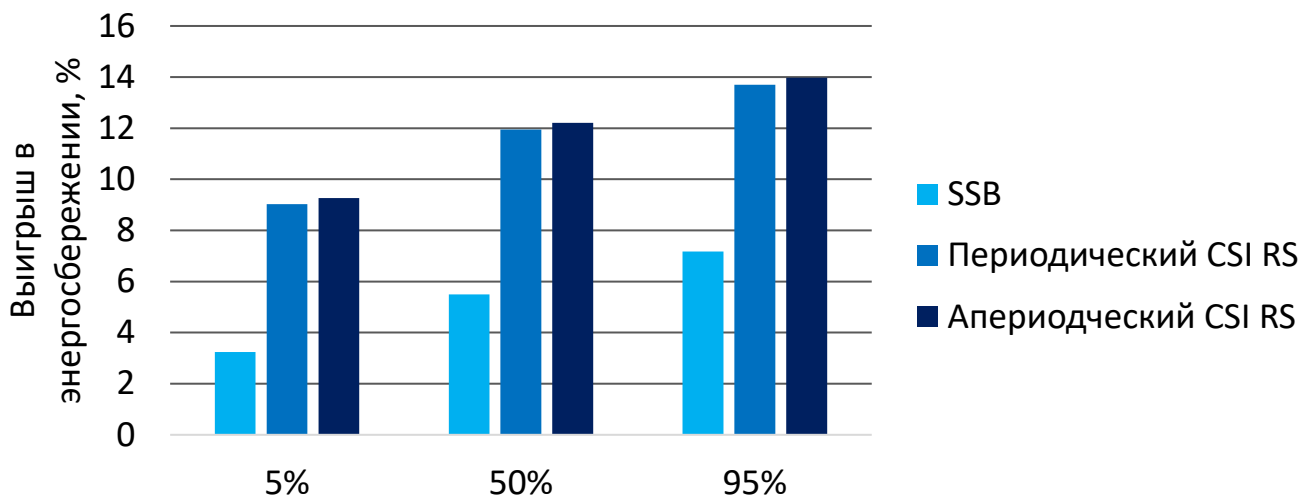


Рисунок 2.21 – Сравнение выигрышей WUS при использовании различных сигналов для синхронизации

Эффективность сигнала пробуждения в энергосбережении UE

На рисунках 2.22 и 2.23 приведены значения выигрыша в энергосбережении от использования сигнала пробуждения UE (WUS) для различных моделей трафика, полученные путем имитационного моделирования системы сотовой связи 5G с параметрами, представленными в таблице 2.8.

Как было описано выше, сигнал WUS позволяет пользовательскому оборудованию (UE) пропускать период On duration в DRX циклах, когда BS не имеет пакета для этого UE. Таким образом, для случаев с низкой загрузкой частотно-временных ресурсов сети связи применение сигнала WUS обеспечивает значительное снижение энергопотребления UE. Это подтверждается данными, приведенными на рисунках 2.22 и 2.23. Как видно из полученных результатов, выигрыш в снижении потребляемой UE энергии для моделей трафика обмена мгновенными сообщениями (Instant messaging) и просмотра веб-страниц (Web-browsing) достигает значений 43% и 67,5%, соответственно.

Однако, как видно из конфигураций значений параметров схемы прерывистого приема (DRX) для различных моделей трафика, представленных в таблице 2.10, длительность таймера On duration является малой частью от общей длительности цикла DRX. Следовательно, использование сигнала WUS не может

обеспечить такого же значительного выигрыша в снижении энергопотребления пользовательского оборудования для случаев со средней и высокой загрузкой частотно-временных ресурсов сети связи, таких как FTP3, VoIP и Video streaming, что также было подтверждено путем имитационного моделирования системы связи 5G (см. рисунки 2.22 и 2.23).

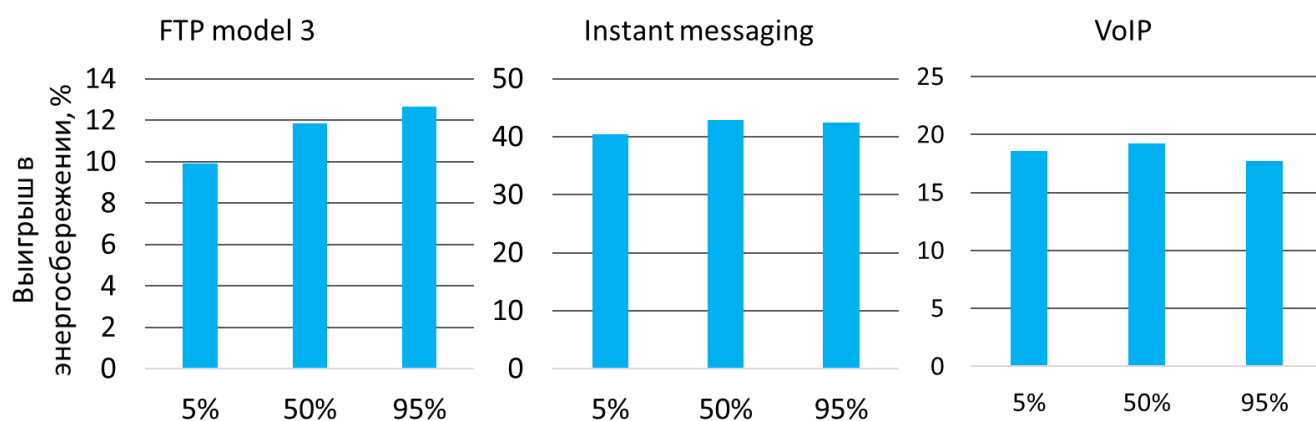


Рисунок 2.22 – Выигрыш WUS в энергосбережении UE для моделей трафика FTP 3, Instant messaging и VoIP

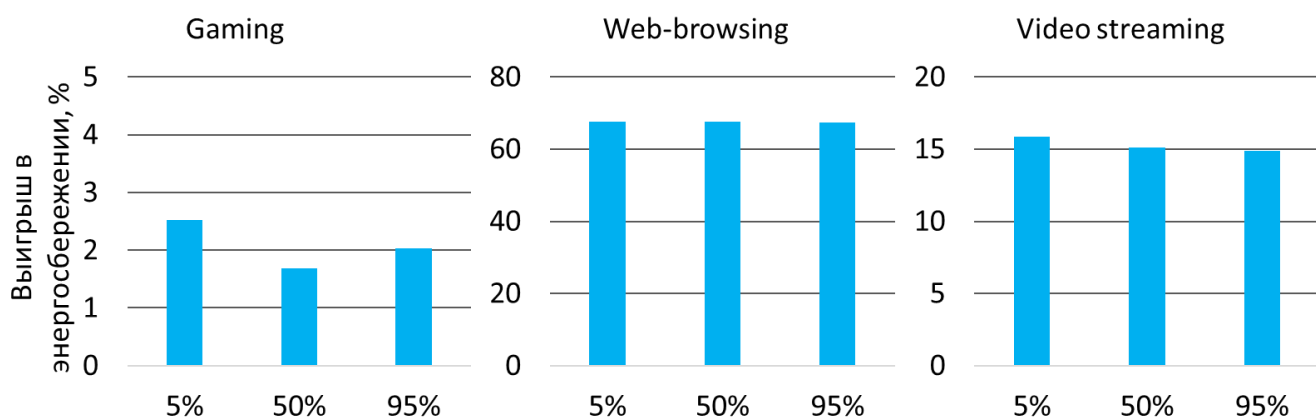


Рисунок 2.23 – Выигрыш WUS в энергосбережении UE для моделей трафика Gaming, Web-browsing и Video streaming

2.3.4. Анализ эффективности межслотового планирования передачи и адаптации конфигурации антенной решетки

Межслотовое планирование передачи

Как обсуждалось в Параграфе 2.2.3, межслотовое планирование передачи, поддерживаемое NR, позволяет UE после получения контрольной информации переходить в режим микросна до конца временного слота. Кроме того, при такой схеме планирования передачи UE может сократить обработку всей выделенной полосы частот до определенной полосы частот, сконфигурированной для мониторинга контрольной информации, что позволяет дополнительно сократить расход энергии.

При моделировании 5G на системном уровне для анализа эффективности межслотового планирования передачи, к модели потребляемой энергии, представленной в таблице 2.9, было добавлено состояние мониторинга контрольной информации в случае использования межслотового планирования передачи со значением потребляемой энергии равное 70 усл. ед.

В стандарте связи NR параметр $K0$ отвечает за временной интервал между передачей BS контрольной информации в канале PDCCCH и передачей данных в канале PUSCH. Если $K0 = 0$, то контрольная информация и данные передаются в одном временном слоте, т.е. используется однослотовое планирование передачи. Для моделирования межслотового планирования передачи было использовано значение $K0 = 1$.

Как показано на рисунке 2.24, на которых представлены выигрыши в энергопотреблении за счет межслотового планирования передачи для моделей трафика FTP 3, Instant messaging и VoIP, использование межслотового планирования может обеспечить значимый выигрыш в энергосбережении UE. Исходя из результатов, представленных на рисунках 2.24 и 2.25, межслотовое планирование приводит к низкому увеличению задержки передачи пакетов (см.

рисунок 2.25), но при этом обеспечивает снижение энергопотребления UE примерно на 20% для всех моделей трафика.

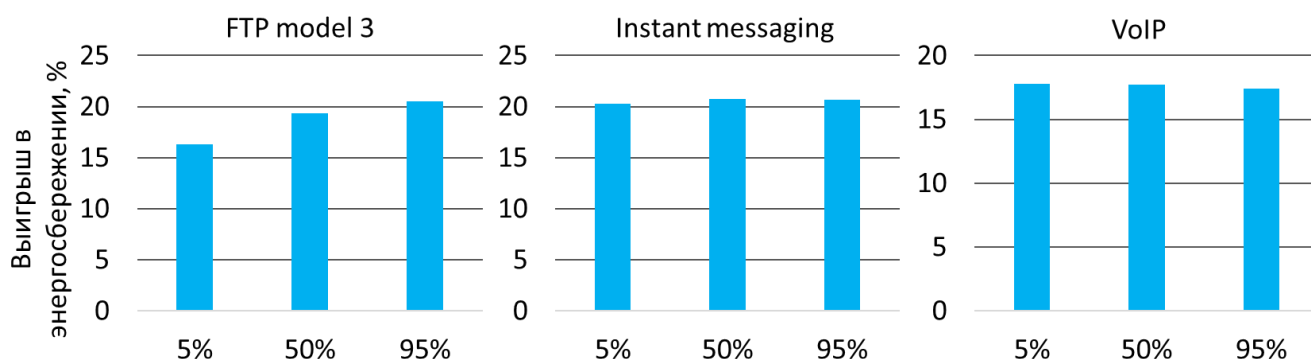


Рисунок 2.24 – Выигрыш в энергосбережении при $K_0=1$

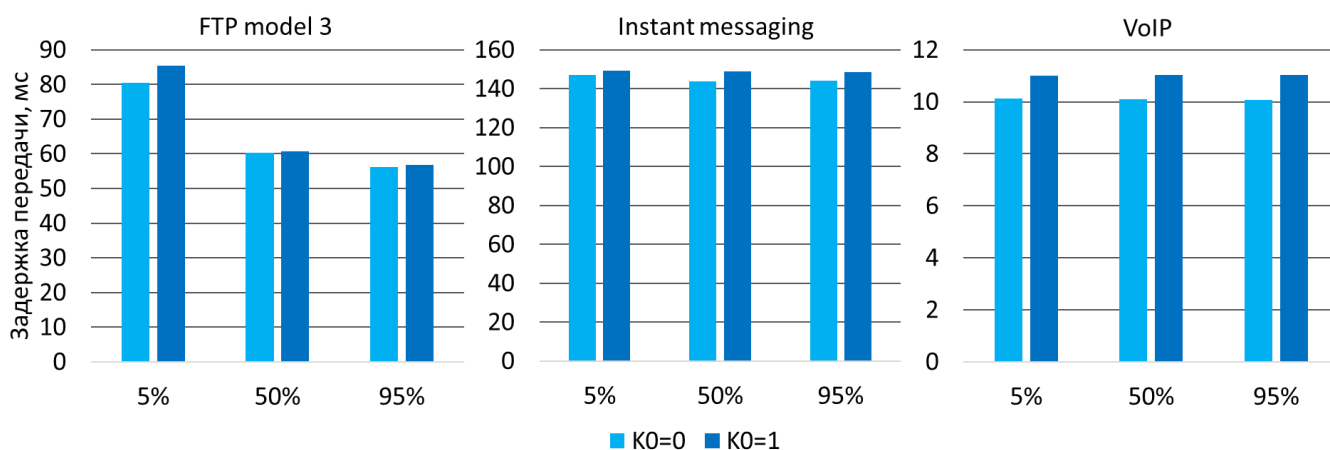


Рисунок 2.25 – Сравнение задержки передачи для $K_0=0$ и $K_0=1$

Анализ эффективности адаптации конфигурации антенной решетки

Для анализа эффективности адаптации конфигурации антенной решетки для энергосбережения UE было произведено сравнение двух конфигураций антенной решетки UE:

1. Стандартная конфигурация антенной решетки UE с четырьмя приемно-передающими элементами (см. таблицу 2.8).
2. Конфигурация антенной решетки UE с количеством приемно-передающих элементов, уменьшенным до двух.

Целью данного анализа было проверить, выполняются ли условия эффективности адаптации конфигурации антенной решетки, описанные в Параграфе 2.2.3.

На рисунке 2.26 показан выигрыш в энергосбережении за счет уменьшения количества приемно-передающих элементов. На рисунке 2.27 представлено сравнение задержки передачи данных для конфигураций антенной решетки UE для моделей трафика FTP 3, обмена мгновенными сообщениями и голосовой связи. На данных рисунках, конфигурация антенной решетки UE с четырьмя приемно-передающими элементами подписана как «4RX», а конфигурация с двумя элементами подписана как «2RX».

Как видно из представленных сравнений, для моделей трафика голосовой связи и обмена мгновенными сообщениями выигрыш в энергосбережении UE составляет около 30%, что больше, чем для модели трафика FTP 3. Также, по сравнению с модель трафика FTP 3, потеря в задержке передачи данных моделей трафика незначительна.

Таким образом, можно сделать вывод, что предположение об условиях эффективности адаптации конфигурации антенной решетки было верно, так как модель голосового трафика является примером выполнения первого условия (малый размер пакета), а модель трафика обмена мгновенными сообщениями является примером выполнения третьего условия (низкая загруженность трафика).

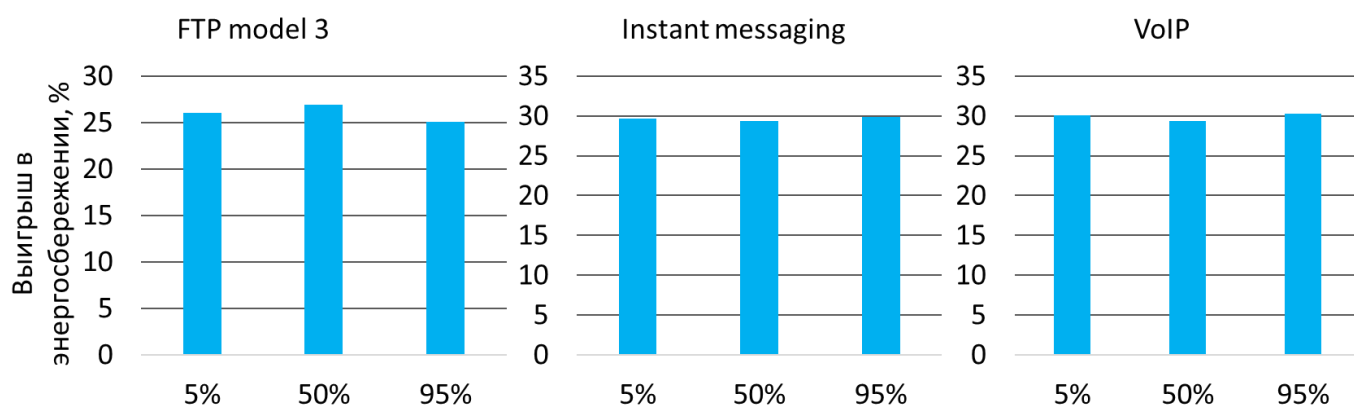


Рисунок 2.26 – Выигрыш в энергосбережении при использовании адаптации антенной решетки

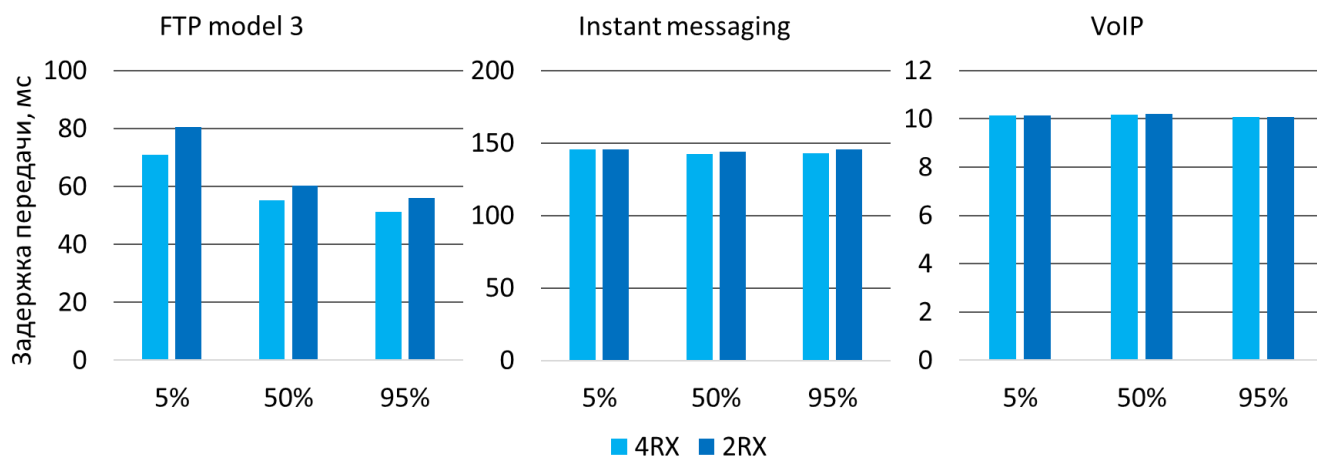


Рисунок 2.27 – Сравнение задержки передачи для конфигураций с двумя и четырьмя приемно-передающими элементами

2.4. Выводы

В Главе 2 была рассмотрена задача энергосбережения пользовательского оборудования в системах беспроводной мобильной связи. В ходе работы были реализованы сценарии моделирования систем беспроводной мобильной связи и модели трафика данных, принятые консорциумом 3GPP, а также проведен подробный анализ работы схемы прерывистого приема DRX, используемой для энергосбережения пользовательского оборудования в первом релизе NR Release 15 систем сотовой мобильной связи пятого поколения (5G).

Путем имитационного моделирования системы 5G, работающей по стандарту NR Release-15, проведен детальный анализ эффективности снижения потребления энергии пользовательским оборудованием при использовании схемы прерывистого приема DRX для различных моделей трафика и наиболее важного сценария (Dense Urban Macro) развертывания систем беспроводной сотовой мобильной связи 5G в городских условиях.

Анализ результатов моделирования показал, что схема прерывистого приема не позволяет достичь верхней границы возможного энергосбережения для всех исследованных моделей трафика по причине неоптимального распределения

интервалов времени различных состояний в DRX цикле, и это связано в основном с интервалами в режиме активного состояния мобильного устройства, когда на базовой станции отсутствуют пакеты для этого пользовательского оборудования.

В работе предложены новые методы повышения энергоэффективности пользовательского оборудования, основанные на адаптации схемы прерывистого приема к поступающему трафику для конкретного пользовательского оборудования за счет использования специализированных сигналов пробуждения этого пользовательского оборудования и перевода этого пользовательского оборудования в режим сна.

Эффективность предложенных алгоритмов энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G 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. 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.

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).

Глава 3 Снижение порога помехоустойчивости систем связи 5G NR

3.1. Методы снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 5G

3.1.1. Улучшение схемы повторения передачи

В NR Release-15 была унаследована схема повторения передачи из LTE. Таким образом, количество слотов для повторения передачи по PUSCH каналу может составлять два, четыре или восемь. Затем, в NR Release-16 была добавлена возможность динамической индикации количества повторений в блоке контрольной информации для восходящего канала связи. Кроме того, максимальное количество повторений было увеличено до 16 повторений, а в NR Release-17 до 32 повторений.

Для дальнейшего снижения порога помехоустойчивости, особенно при рассмотрении дуплексной передачи с временным разделением передач по восходящей и нисходящей линиям связи, т.е. имеющей ограниченное количество последовательных слотов для передачи по восходящему каналу связи, в NR Release-17 была добавлена возможность передачи повторений по непоследовательным сериям слотов, что является основным отличием схемы повторения передачи в стандарте NR от аналогичной схемы в стандарте LTE.

3.1.2. Межслотовая совместная оценка канала с объединением опорных сигналов демодуляции

На границе соты мобильных систем связи оценка канала оказывает значительное влияние на производительность передачи, и поэтому способы улучшения качества оценки канала являются первоочередными при изучении методов снижения порога помехоустойчивости мобильных систем связи 5G.

В первом релизе стандарта NR (NR Release-15), оценка канала для демодуляции данных каждого слота основана на символах DM-RS в слоте. Таким образом, один из способов повысить точность оценки канала – обеспечить возможность для приемника совместно обрабатывать символы DM-RS из нескольких слотов. Для этой цели передатчик должен согласованно передавать символы DM-RS на протяжении нескольких слотов, повторений передачи, т.е. передатчик должен поддерживать непрерывность фазы между символами DM-RS на протяжении последовательных слотов.

Также, возможность совместной обработки опорных сигналов демодуляции позволяет улучшить оценку смещения несущей частоты на UE, так как данная процедура также может осуществляться, используя символы DM-RS [20].

3.1.3. Межслотовое переключение частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для совместной оценки канала

Как и в беспроводных системах мобильной сотовой связи четвертого поколения, передачи по нисходящему и восходящему каналам связи в 5G группируются в кадры равные 10 мс, каждый из которых состоит из десяти субкадров. В то же время, в отличие от систем связи 4G LTE, где минимальным временным интервалом является субкадр равный 1 мс, в системах связи пятого

поколения стандарта NR минимальным временным интервалом является слот, который меньше субкадра в определенное число раз, определяемое так называемой нумерологией, сконфигурированной для определенного UE. Как показано в таблице 3.1, каждой нумерологии соответствует определенное расстояние между поднесущими частотами (subcarrier spacing, SCS).

Таблица 3.1 – Нумерологии, поддерживаемые в стандарте NR

μ	Расстояние между поднесущими $\Delta f = 2^{\mu} \cdot 15$, кГц
0	15
1	30
2	60
3	120
4	240
5	480
6	960

Таким образом, количество слотов в одном субкадре, т.е. в 1 мс, можно вычислить, используя индекс нумерологии, и равно 2^{μ} .

По причине поддержки нескольких нумерологий в стандарте NR стандартное переключение частоты выполняется внутри слота и между слотами в отличие от LTE, где переключение частоты выполняется внутри субкадра и между субкадрами, как было описано в Параграфе 1.6.1.

Как можно видеть из рисунка 3.1а, при стандартном распределении частотно-временных ресурсов при межслотовом переключении частот, т.е. при перестройке частоты после каждого повторения, использование межслотовой совместной оценки канала невозможно по причине отсутствия последовательных слотов с единой ресурсной аллокацией для объединения опорных сигналов демодуляции.

На рисунке 3.1б показан пример специализированного шаблона переключения частот между слотами, предложенного в патентах [50, 51], с сохранением ресурсной аллокации на протяжении двух последовательных слотов, что позволяет при сохранении непрерывности фазы между символами DM-RS использовать для них совместную оценку канала связи.

По причине необходимости использования одной ресурсной аллокации для всех слотов при использовании схемы повторения передачи, а также из-за отсутствия требования в стандартах LTE и NR к обеспечению непрерывности фазы символов DM-RS между слотами, схема повторной передачи не может быть использована одновременно с межслотовым переключением частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для совместной оценки канала, что является основным недостатком схемы повторной передачи и одним из преимуществ схемы, описанной далее в Параграфе 3.1.4, а также в патенте [52].

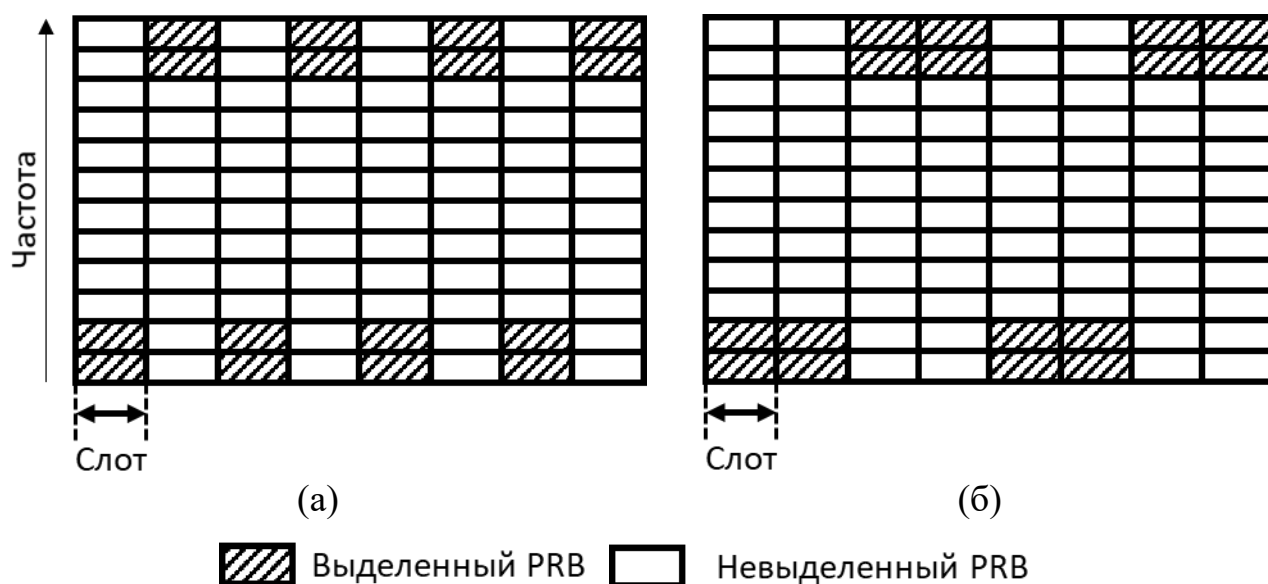


Рисунок 3.1 – Пример распределения частотно-временных ресурсов при межслотовом переключении частот: а – стандартное распределение в NR Release - 15, б – распределение ресурсов для объединения DM-RS символов

3.1.4. Мультислотовая передача данных по восходящему каналу связи

При оценке порога помехоустойчивости системы связи производится поиск наихудшего сценария, т.е. сценария с самым низким отношением сигнал шум (ОСШ), обычно реализуемого для пользователей, расположенных на границе соты системы мобильной связи. В то же время для всех пользователей сотовой связи

должно быть обеспечено определенное качество обслуживания (quality of service, QoS), включающее верхний предел на максимальную задержку передачи пакетов для каждого пользователя в отдельности и на общую способность системы обслуживать определенное количество пользователей, для которых выполнено условие ограничения сверху на задержку при передаче пакета данных.

Для сценария с самым низким отношением сигнал шум, размера одного блока частотно-временных ресурсов (Physical Resource Block, PRB) недостаточно для успешной передачи пакета за один слот, т.е. с достаточно низкой скоростью кодирования и модуляцией. Это выполняется даже при малом размере пакета, например для голосовой связи. В этом случае в системах связи стандарта LTE и первого релиза стандарта NR существует ряд методов, которые могут быть использованы базовой станцией для планирования приема пакетов от пользователей:

1. Разделение пакета данных на более мелкие части с последующей передачей каждой части отдельно.
2. Использование гибридной схемы повторной передачи с автоматическим запросом (HARQ) для повторной передачи пакета в случае неуспешности приема. Данная схема позволяет понижать скорость кодирования при каждом повторении передачи, что увеличивает вероятность успешного декодирования.
3. Использование схемы повторения передачи, описанной в Параграфе 1.6.2.

При использовании первого подхода каждая часть пакета передается с более низкой кодовой скоростью и модуляцией, чем при передаче полного пакета, что приводит к более высокой вероятности успешной передачи. Основным недостатком этого подхода является увеличение накладных расходов на более высоких уровнях стека системы связи из-за необходимости добавлять заголовок к каждой из принятых частей на каждом из высоких уровней. В то же время дополнительным источником увеличения накладных расходов также является

последовательность циклического избыточного кода (cyclic redundancy check, CRC), которая добавляется на физическом уровне к каждой из частей пакета данных для проверки успешности передачи. Кроме того, этот подход не гарантирует определенную задержку в передаче целого пакета из-за необходимой задержки между передачами отдельных частей пакета при условии загрузки канала связи.

Второй подход, т.е. использование схемы HARQ, также не гарантирует определенной задержки в передаче пакета пользователю из-за задержки перед повторной передачей пакета, которая складывается из задержек запроса повторной передачи и планирования повторной передачи.

Третий подход, т.е. использование схемы повторной передачи, может гарантировать задержку передачи пакета, но также имеет недостатки, описанные в Параграфе 1.6.2.

Суммируя вышесказанное, с точки зрения пропускной способности сотовой связи, когда базовая станция обслуживает большое количество пользователей на границе сотовой связи, перечисленные подходы значительно ограничивают количество пользователей, для которых может быть обеспечено необходимое качество обслуживания.

Новый тип передачи данных по восходящему каналу связи

Новый, четвертый, 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, как в подходах 1 и 2. Например, при использовании голосовой связи UE должен передавать 328 бит за 20 мс. Для сценария с наихудшим состоянием канала, для максимального увеличения ОСШ при ограниченной мощности передатчика на UE производится максимизация спектральной плотности мощности за счет выделения минимальной ресурсной аллокации для передачи в слоте равной одному ресурсному блоку. Используя такую ресурсную аллокацию, невозможно передать полный пакет 328 бит за один слот с достаточно низкой модуляцией (BPSK или QPSK) из-за недопустимой скорости кодирования, т.е. больше 0,95. В то же время, используя схему TBoMS или схему повторения передачи, например, путем конфигурирования четырех слотов для передачи TBoMS, такой пакет данных может быть передан с использованием QPSK модуляции и с низкой скоростью кодирования около 30%.

Отличие от схемы повторной передачи

Главным отличием схемы TBoMS является измененная схема выбора бит (bit selection) из циклического буфера LDPC кодов для операции согласования скорости кодирования (rate matching).

Как описано в Параграфе 1.6.2, в стандартной схеме согласования скорости кодирования кодов с малой плотностью проверки на четность в стандарте связи NR каждому повторению передачи соответствует свой индекс версии избыточности (redundancy version, RV). Это означает, что для каждого повторения передачи выбор бит из циклического буфера начинается с фиксированной позиции, определенной в стандарте NR, независимой от выбора бит для других повторений передачи.

Стоит также учесть, что позиции версий избыточности распределены неравномерно по циклическому буферу так, чтобы начало последней, под номером 3, версии избыточности было приближено к концу циклического буфера. Это позволяет гарантировать достаточно большой процент систематических бит, передаваемых при передаче данных с последней версией избыточности, для обеспечения возможности декодирования такой передачи самостоятельно от основной передачи при потере по какой-либо причине основной, т.е. первой, передачи.

На рисунке 3.2 представлен пример проверочной матрицы LDPC из стандарта NR [53]. На примере показано разделение на пять матриц (A, B, C, D, E), являющимися частями матрицы LDPC в данном стандарте. Каждая часть состоит из нулевых подматриц или подматриц, полученных из единичных квадратных матриц циклическим сдвигом единичных элементов право. Таким образом, на рисунке 3.2 при записи матрицы LDPC ячейка с числом соответствует подматрице, полученной из единичной матрицы, циклически сдвинутой на это число. Пустые ячейки соответствуют нулевым подматрицам. Желтым цветом выделен пример ортогональных строк, т.е. таких строк, в которых ненулевые подматрицы одной строки расположены в столбцах, отличающихся от столбцов, в которых расположены ненулевые подматрицы другой строки.

Как можно заметить из примера матриц LDPC на рисунке 3.2, плотность ненулевых подматриц в строке неизменна для матрицы A и спадает при движении вниз по матрице D. Причем максимальная плотность наблюдается в матрице A.

Таким образом, можно разделить биты кодовой последовательности по количеству информации, которую они содержат о других битах после операции кодирования, т.е. создать оптимальный порядок передачи бит кодовой последовательности.

Над матрицей на примере из рисунка 3.2 расположен вектор кодовой последовательности, соответствующей минимальной скорости кодирования LDPC матрицы. По соответствию частей кодовой последовательности и частей матрицы LDPC видно, что матрицы A и B участвуют при вычислении первой группы проверочных бит (П1), а матрицы D и E участвуют в построении второй группы (П2). Таким образом, оптимальным для кодовой последовательности является прямой порядок передачи бит:

1. Систематические биты, несущие равное (максимальное) количество информации.
2. Проверочные биты первой группы, также несущие равное между собой количество информации.
3. Проверочные биты второй группы, несущие количество информации, убывающее при движении к концу кодовой последовательности.

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

Так как матрицы LDPC в стандарте NR спроектированы для определенного конечного набора размеров подматриц, для некоторых размеров пакета данных может выполняться следующее условие:

$$K_b \cdot Z \neq K, \forall Z, \quad (3.1)$$

где K_b – количество столбцов матрицы A (систематических столбцов); Z – размер подматрицы; K – размер пакета данных.

В таком случае, размером подматрицы выбирается минимальное значение, для которого выполняется условие:

$$K_b \cdot Z \geq K. \quad (3.2)$$

Процедура вычисления начального бита в циклическом буфере для n -го слота, сконфигурированного для TBoMS передачи, изображена на рисунке 3.3.

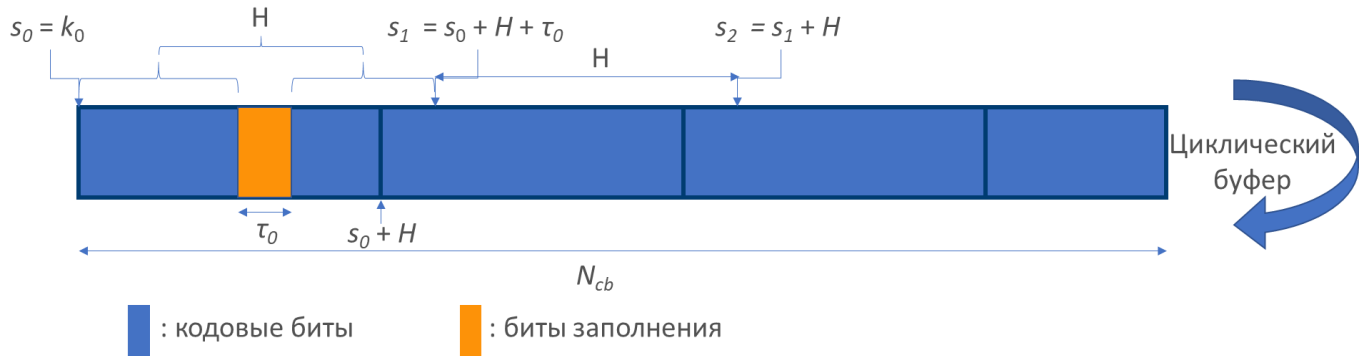


Рисунок 3.3 – Процедура вычисления начального бита в циклическом буфере для n -го слота TBoMS передачи

Для анализа выигрыша схемы TBoMS в снижении вероятности блоковой ошибки за счет изменения алгоритма процедуры согласования скорости кодирования по сравнению со схемой повторения передачи на рисунке 3.4 и рисунке 3.5 показаны качественные примеры процедуры выбора бит при средней скорости кодирования и низкой скорости кодирования соответственно.

Как видно из представленных примеров, неоптимальность алгоритма выбора бит при использовании схемы повторения передачи приводит к пропуску части кодовых бит при высоких и средних скоростях кодирования, а также приводит к частичному перекрытию выбранных бит между передачами.

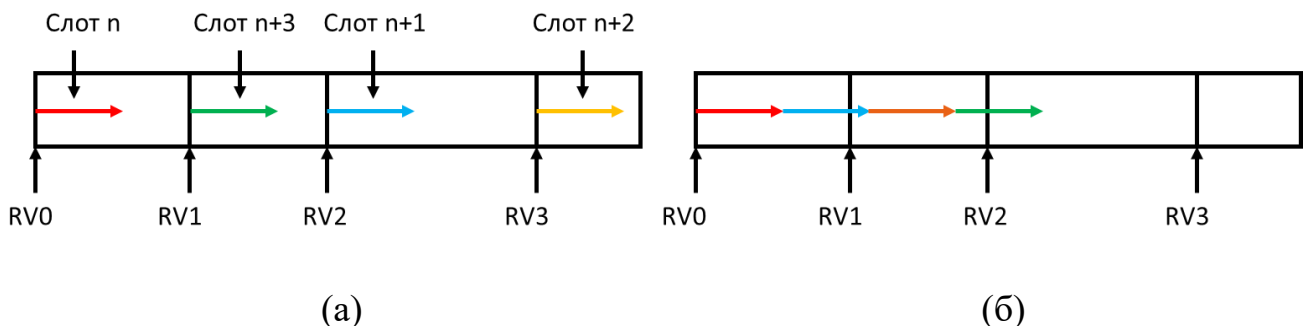


Рисунок 3.4 – Пример процедуры выбора бит при средней скорости кодирования: а – для схемы повторения передачи, б – для схемы TBoMS

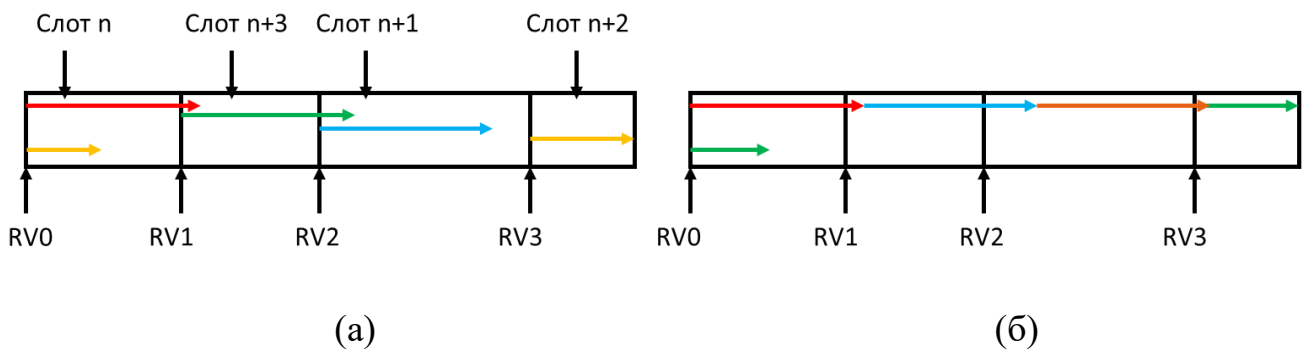


Рисунок 3.5 – Пример процедуры выбора бит при низкой скорости кодирования:
а – для схемы повторения передачи, б – для схемы TBoMS

3.2. 3GPP модели канала связи для моделирования беспроводных мобильных систем связи на физическом уровне

Для моделирования беспроводных мобильных систем связи на физическом уровне используются две группы моделей канала связи, разработанных консорциумом 3GPP:

1. Группа моделей канала связи Clustered Delay Line (CDL) используется для моделирования канала, когда принятый сигнал состоит из нескольких кластеров с различными задержками — каждый кластер содержит многолучевые компоненты с одинаковой задержкой, но с незначительными отличиями в углах отправления и прибытия.
2. Группа упрощенных моделей канала связи Tapped Delay Line (TDL), где каждая модель разработана под определенный сценарий. Данные модели могут быть использованы в случае «упрощенной» симуляции физического уровня мобильных систем связи без моделирования MIMO антенных решеток. TDL модель канала связи — это многолучевая модель, в которой для каждого луча специфицирована задержка и мощность для последующей генерации случайного числа по заданному распределению.

Три модели TDL, а именно TDL-A, TDL-B и TDL-C, построены для представления трех различных профилей каналов с распространением волны от источника, находящегося вне прямой видимости (non-line-of-sight, NLOS), в то время как TDL-D и TDL-E построены для LOS (line-of-sight) сценария, т.е. для случая, когда источник волны (передатчик) находится в прямой видимости приемника. Параметры моделей TDL-C и TDL-D, используемых в данной работе, представлены в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2 – Параметры модели TDL-C

Модель Луч	TDL-C		
	Нормированная задержка	Мощность в дБ	Распределение замирания
1	0	-4,4	Рэлеевское
2	0,2099	-1,2	
3	0,2219	-3,5	
4	0,2329	-5,2	
5	0,2176	-2,5	
6	0,6366	0	
7	0,6448	-2,2	
8	0,6560	-3,9	
9	0,6584	-7,4	
10	0,7935	-7,1	
11	0,8213	-10,7	
12	0,9336	-11,1	
13	1,2285	-5,1	
14	1,3083	-6,8	
15	2,1704	-8,7	
16	2,7105	-13,2	Рэлеевское
17	4,2589	-13,9	
18	4,6003	-13,9	
19	5,4902	-15,8	
20	5,6077	-17,1	
21	6,3065	-16	
22	6,6374	-15,7	
23	7,0427	-21,6	
24	8,6523	-22,8	

Таблица 3.3 – Параметры модели TDL-D

Модель Луч	TDL-D		
	Нормированная задержка	Мощность в дБ	Распределение замирания
1	0	-0,2	Прямая видимость
	0	-13,5	
2	0,035	-18,8	Рэлеевское
3	0,612	-21	
4	1,363	-22,8	
5	1,405	-17,9	
6	1,804	-20,1	
7	2,596	-21,9	
8	1,775	-22,9	
9	4,042	-27,8	
10	7,937	-23,6	
11	9,424	-24,8	
12	9,708	-30,0	
13	12,525	-27,7	

Примечание: первый луч описывается распределением Райса с К-фактором $K_1 = 13,3$ дБ и средней мощностью 0 дБ.

3.3. Результаты компьютерного моделирования

Эффективность и выигрыш от использования описанных схем снижения порога помехоустойчивости систем беспроводной связи 5G были проверены путем компьютерного моделирования на симуляторе физического уровня, основанного на стандарте NR Release-17 [26, 53-55]. 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.

Параметры моделирования представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры сценариев моделирования на физическом уровне

Сценарий	Rural FDD 700 МГц	Urban TDD 4 ГГц
Физический канал	PUSCH	PUSCH
Тип дуплексной передачи	FDD	TDD
Несущая частота	700 МГц	4 ГГц
Полоса частот	20 МГц	100 МГц
Модуляция сигнальной волны	DFT-s-OFDM	
Расстояние между поднесущими	15 кГц	30 кГц
Параметры кодирования и модуляции	Модуляция QPSK MCS 0 Размер транспортного блока 136 бит	Модуляция QPSK MCS 3 Размер транспортного блока 288 бит
Ресурсная аллокация	Однослотовая передача: 14 символов и 4 ресурсных блока ТВоMS или схема повторения передачи: 4 слота, 14 символов и 1 ресурсный блок в каждом слоте	
Антенная конфигурация UE	1 передающий элемент	
Антенная конфигурация BS	2 приемных элемента	4 приемных элемента
Модель канала	TDL-C средняя задержка распространения 300 нс	
Скорость UE	3 км/ч	
Количество символов DM-RS	2	
Алгоритм оценки канала	Оценка канала по принципу минимальной среднеквадратичной ошибки (MMSE)	
Метрика производительности	10% BLER	

Анализ схемы повторения передачи

На рисунке 3.6 показан пример зависимости вероятности блоковой ошибки от ОСШ для различного количества повторений передачи для деревенского сценария с несущей частотой 700 МГц. При моделировании использовался метод переключения частоты внутри слота.

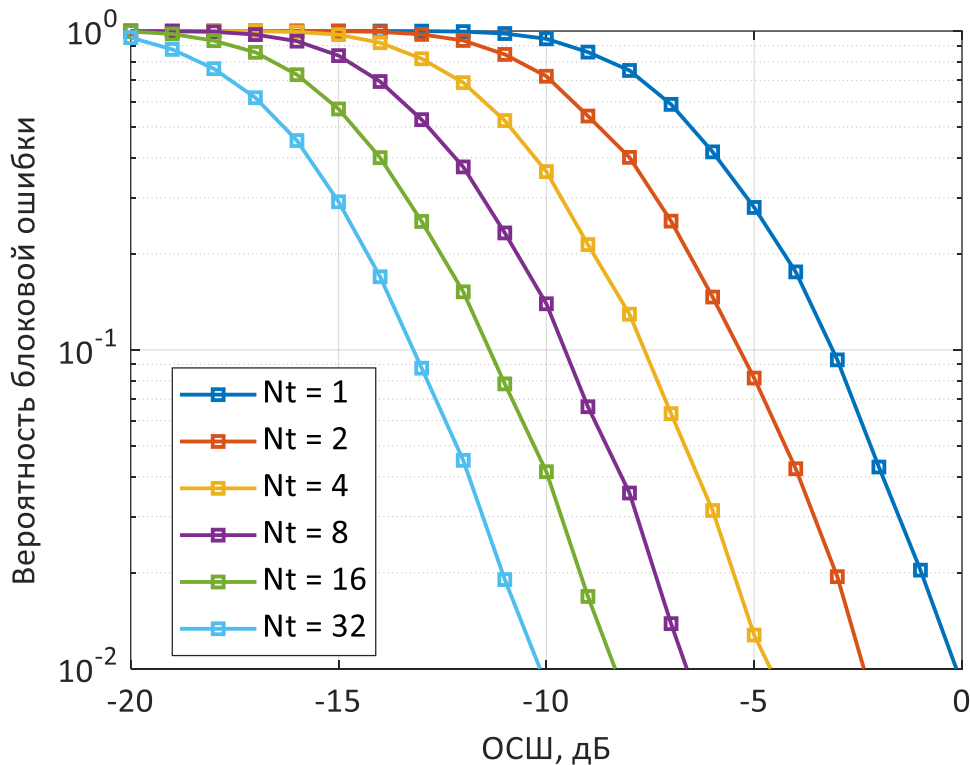


Рисунок 3.6 – Сравнение выигрыша в производительности при использовании схемы повторения передачи для различного количества повторений

Как можно заметить из данного примера, при увеличении количества повторных передач замедляется снижение порога вероятности блоковой ошибки равной 10%, что объясняется ухудшением качества оценки канала при движении в сторону понижения ОСШ.

Анализ схемы переключения частоты

На рисунках 3.7 и 3.8 показано сравнение эффективности в снижении вероятности блоковой ошибки схемы переключения частоты между слотами при различном количестве используемых ресурсных аллокаций. На данных рисунках кривые вероятности блоковой ошибки для двух и четырех ресурсных аллокаций

подписаны как $N_a = 2$ и $N_a = 4$, соответственно. Из сравнений видно, что увеличение количества ресурсных аллокаций с двух до четырех обеспечивает значительный выигрыш в снижении порога помехоустойчивости порядка 1-2 дБ.

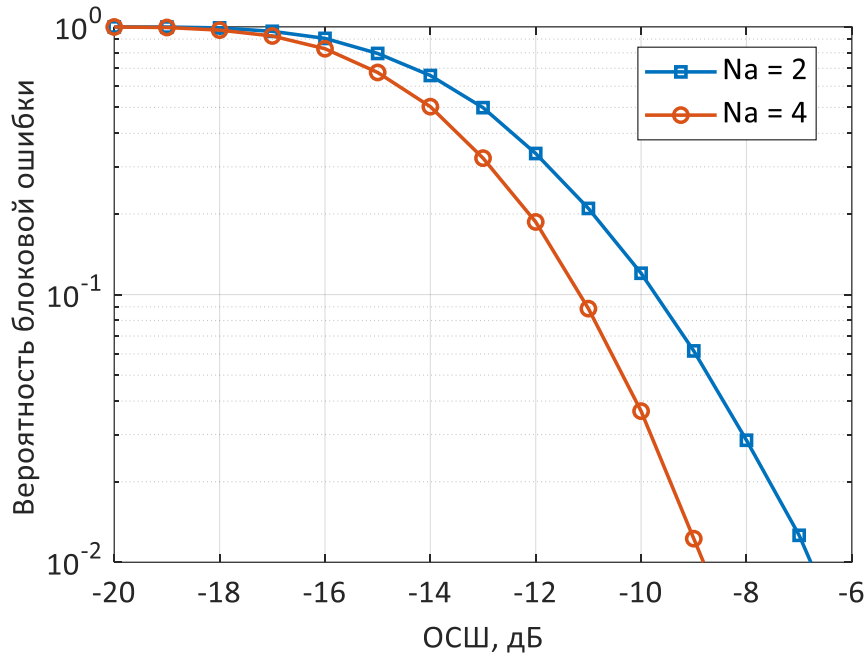


Рисунок 3.7 – Сравнение производительности схемы переключения частоты между слотами при различном количестве используемых аллокаций для сценария Rural 700 МГц

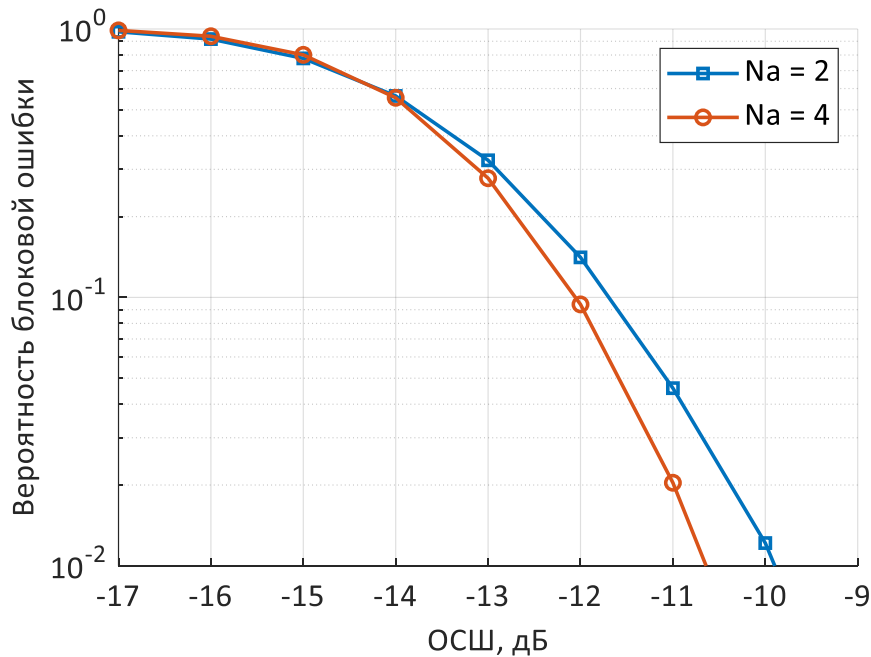


Рисунок 3.8 – Сравнение производительности схемы переключения частоты между слотами при различном количестве используемых аллокаций для сценария Urban 4 ГГц

Анализ схемы мультислотовой передачи данных

Для анализа эффективности схемы мультислотовой передачи данных, TBoMS, для обоих сценариев, перечисленных в таблице 3.4, было произведено сравнение следующих конфигураций:

1. Однослотовая передача по каналу PUSCH с четырьмя ресурсными блоками, выделенными для передачи в слоте.
2. Передача TBoMS с четырьмя сконфигурированными слотами и одним ресурсным блоком, выделенным в каждом слоте.
3. Передача TBoMS с четырьмя сконфигурированными слотами и одним ресурсным блоком, выделенным в каждом слоте. Кроме того, используется стандартная схема межслотовой перестройки частоты с двумя ресурсными аллокациями.
4. Передача TBoMS с четырьмя сконфигурированными слотами и одним ресурсным блоком, выделенным в каждом слоте. Кроме того, используется межслотовая перестройка частоты с двумя частотными аллокациями и межслотовым переключением частоты с объединением опорных сигналов демодуляции для совместной оценки канала для объединенных пар слотов, как показано на рисунке 3.1б.

На рисунках 3.9 и 3.10 представлены сравнения зависимостей вероятностей блоковой ошибки от ОСШ для описанных конфигураций при моделировании городского и деревенского сценариев, соответственно. Сравнивая кривые для конфигураций 2 и 3, можно видеть, что перестройка частоты обеспечивает значительное снижение порога помехоустойчивости примерно на 2 дБ. Сравнивая кривые для конфигураций 3 и 4, можно видеть, 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.

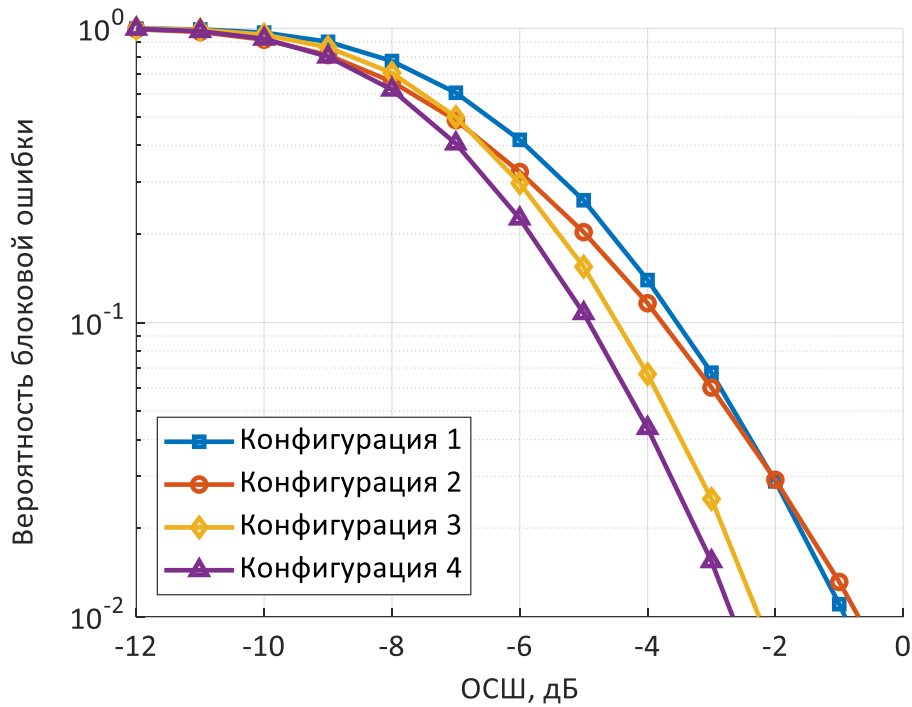


Рисунок 3.9 – Сравнение BLER для сценария Urban 4 ГГц

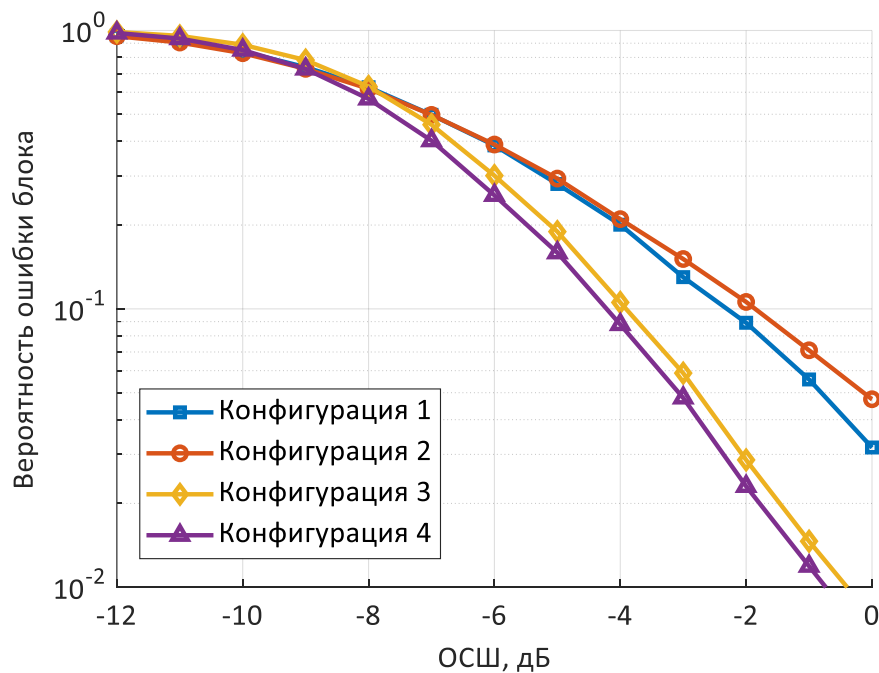


Рисунок 3.10 – Сравнение BLER для сценария Rural 700 МГц

На рисунке 3.11 показан пример выигрыша в снижение порога помехоустойчивости за счет использования улучшенной схемы согласования скорости кодирования для TBoMS передачи. Было произведено сравнение со стандартной схемой повторения передачи для сценария Rural 700 МГц из таблицы 3.4, но с дополнительными размерами передаваемого блока данных (TBS),

равными 528 бит и 704 бит, т.е. для средних скоростей кодирования (MCS 6 и MCS 8 из [55]).

Как видно из примера на рисунке 3.11, выигрыш в снижении BLER за счет использования улучшенной схемы выбора бит для операции согласования скорости кодирования может достигать примерно 1 дБ.

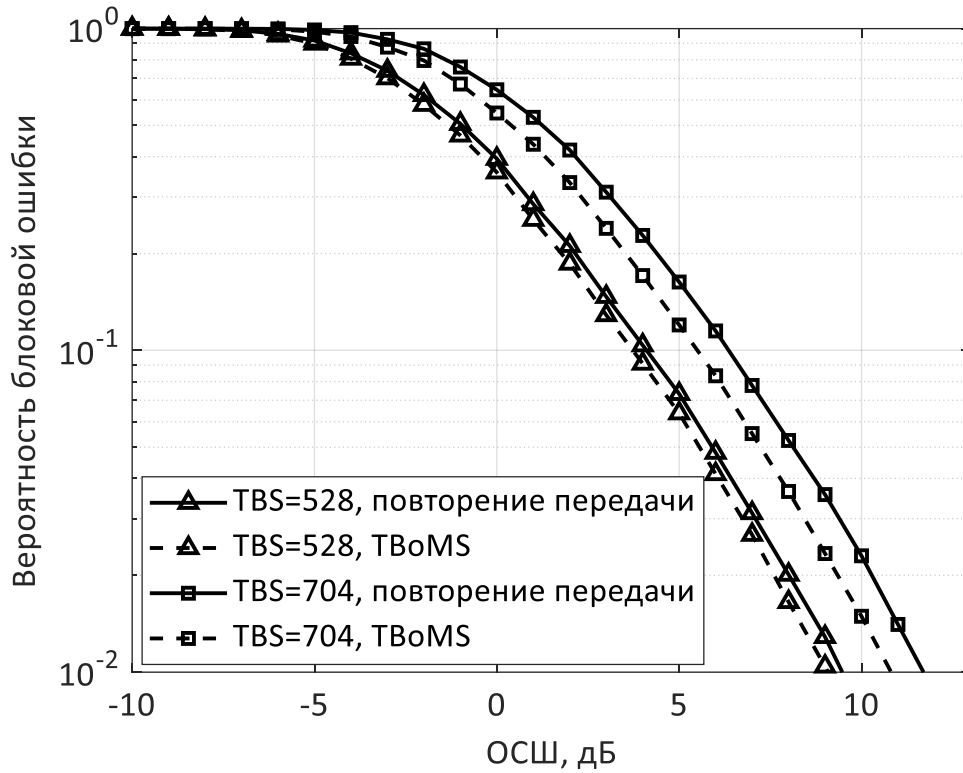


Рисунок 3.11 – Сравнение производительности TBoMS со стандартной схемой повторения передачи

3.4. Выводы

В Главе 3 была рассмотрена задача снижения порога помехоустойчивости систем беспроводной мобильной связи. Представлены методы для уменьшения вероятности блоковой ошибки пользовательского оборудования на границе ячейки систем сотовой связи 5G, т.е. для сценария плохого состояния канала. В том числе был представлен новый тип мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи систем 5G, имеющий ряд отличий и улучшений относительно схемы повторения передачи.

Также были рассмотрены: схема перестройки частоты внутри слота и между слотами в 5G и метод совместной оценки канала с межслотовым объединением опорных сигналов демодуляции.

Эффективность в снижении порога помехоустойчивости путем использования предложенных алгоритмов в системах связи 5G была изучена путем компьютерного имитационного моделирования беспроводных сетей связи на физическом уровне. Из полученных результатов видно, что перестройка частоты обеспечивает значительное снижение порога помехоустойчивости. Также показано, что увеличение количества ресурсных аллокаций с двух до четырех обеспечивает дополнительный выигрыш в производительности порядка 1-2 дБ.

Анализ эффективности в снижении порога помехоустойчивости схемы мультислотовой передачи по восходящему каналу связи показывает, 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 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.

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.

Глава 4 Метод адаптации к нелинейным искажениям передаваемых сигналов в системах связи пятого поколения

4.1. Описание системной модели

Обобщенная структурная схема передатчика с квадратурным модулятором показана на рисунке 4.1. В данной модели системы, “идеальные” компоненты сигнала генерируются в цифровом сигнальном процессоре (Digital signal processor, DSP), трансформируются в аналоговые сигналы в цифроаналоговых преобразователях, сдвигаются в квадратурном модуляторе на необходимую полосу частот с помощью синусоидальных сигналов гетеродина (local oscillator, LO) и после прохождения полосовых фильтров (band-pass filter, BPF) и суммирования поступают в усилитель мощности (power amplifier, PA).

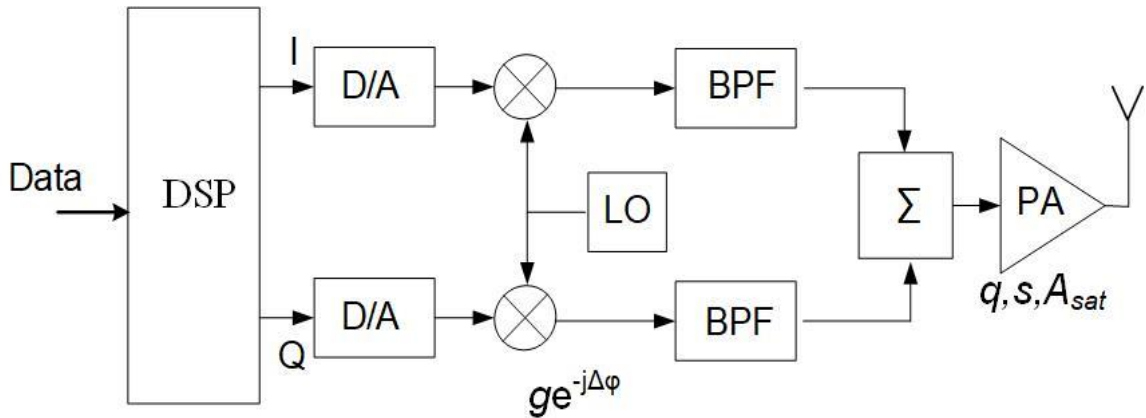


Рисунок 4.1 – Обобщенная структурная схема передатчика.

Для моделирования искажений на усилителе мощности передатчика использовалась хорошо известная модель Рарр [56], которая описывает амплитудные искажения АМ-АМ следующим образом:

$$G(A) = q \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{qA}{A_{sat}}\right)^{2s}\right)^{\frac{1}{2s}}}, \quad (4.1)$$

где $G(A)$ – выходная амплитуда; A – среднеквадратичная входная амплитуда сигналов на усилителе мощности в вольтах; q – малый коэффициент усиления сигнала; s – коэффициент плавности усиления; A_{sat} – уровень насыщения. На рисунке 4.2 показана серия кривых преобразования АМ-АМ, построенных с использованием формулы (4.1) для различных значений параметра s , $q=1$ и $A_{sat}=1$. Можно видеть, что коэффициент плавности s управляет резкостью перехода в область насыщения. При увеличении данного параметра кривые АМ-АМ приближаются к характеристике идеального линейного усилителя с ограничением на уровне A_{sat} .

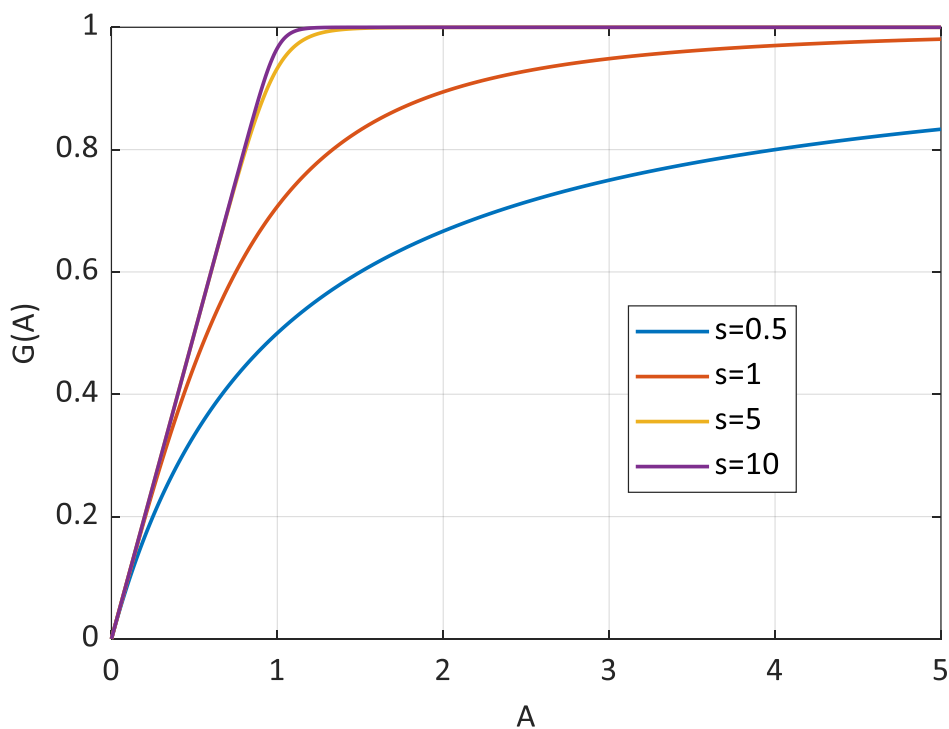


Рисунок 4.2 – Кривые АМ-АМ для модели Рарр

В данной работе не учитываются нелинейные фазовые искажения АМ-РМ, поскольку их влияние значительно меньше, чем искажения АМ-АМ для большинства реальных радиочастотных устройств.

Для моделирования дисбаланса I/Q компонент была использована модель, представленная в документах по методологии оценки стандартов IEEE 802.11ad [57] и IEEE 802.11ay [58]:

$$y_d(t) = \mu y(t) + \nu y^*(t), \quad (4.2)$$

где $y(t)$ – идеальный комплексный сигнал передачи; $y_d(t)$ – искаженный комплексный сигнал с учетом дисбаланса I/Q компонент. Также для удобства анализа далее предполагается, что общий дисбаланс между компонентами I и Q (см. рисунок 4.1) возникает из-за отклонения амплитуды сигнала от единицы $g \neq 1$ и сдвига фазы $\Delta\varphi \neq 0$ сигнала гетеродина только в квадратурной компоненте. В этом случае, если мы представим идеальный комплексный передаваемый сигнал $y(t)$ в виде квадратурных составляющих $A_c(t)$ и $A_s(t)$:

$$y(t) = A_c(t) + jA_s(t). \quad (4.3)$$

Тогда искаженный комплексный сигнал (4.2) может быть записан в виде:

$$y_d(t) = A_c(t) + jge^{-j\Delta\varphi} A_s(t). \quad (4.4)$$

Простые манипуляции с формулами 4.2 и 4.4 показывают, что коэффициенты μ и ν в формуле 4.4 выражаются как:

$$\mu = \frac{1+ge^{j\Delta\varphi}}{2}, \quad (4.5)$$

$$\nu = \frac{1-ge^{j\Delta\varphi}}{2}. \quad (4.6)$$

Для $g = 1$ и $\Delta\varphi = 0$ мы имеем идеальный модулятор с $\mu = 1$ и $\nu = 0$. Очевидно, что асимметричное введение дисбаланса только в одной квадратурной компоненте не уменьшает общности используемой модели, поскольку на характеристики системы влияет только разница между компонентами I и Q, а не абсолютные значения.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены диаграммы рассеяния принятого 16QAM сигнала, иллюстрирующие примеры влияния таких искажений, как дисбаланс I/Q компонент сигнала и нелинейность усилителя мощности, соответственно, при

предположении, что линейное малое усиление сигнала равно единице ($q = 1$). Диаграмма рассеяния для искаженного сигнала с модуляцией 16QAM показана на рисунке 4.4 для отношения уровня насыщения A_{sat} к эффективной амплитуде A_{eff} входного сигнала на усилителе мощности $Sat = A_{sat} / A_{eff} = 1$.

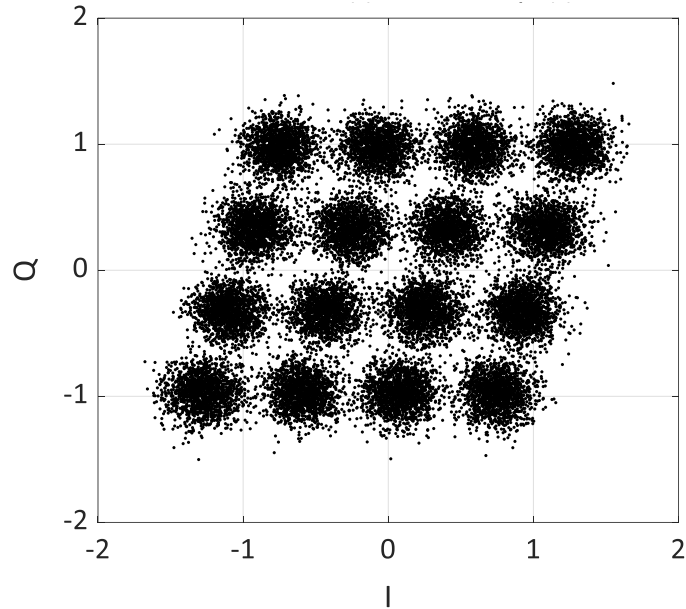


Рисунок 4.3 – Иллюстрация влияния дисбаланса I/Q компонент на диаграмму рассеяния сигнала 16QAM со сдвигом фазы 30 градусов при ОСШ = 15 дБ

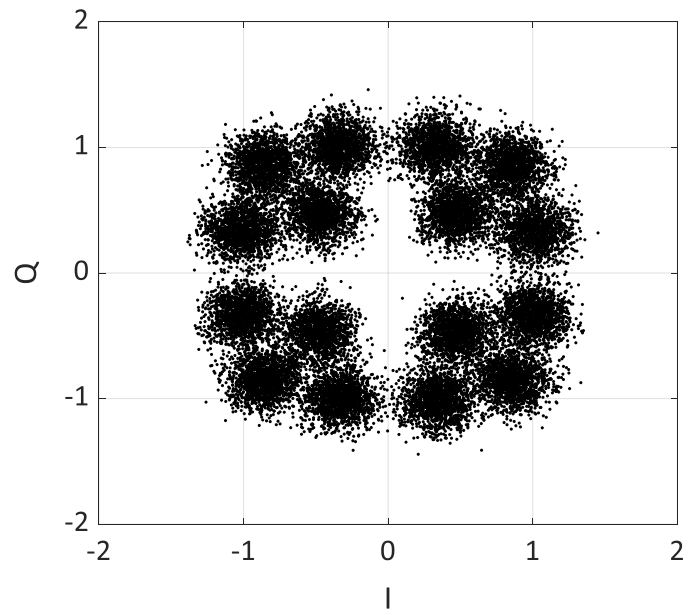


Рисунок 4.4 – Иллюстрация влияния нелинейности усилителя мощности на диаграмму рассеяния сигнала 16QAM для уровня насыщения $Sat = 1$ при ОСШ = 15 дБ

4.2. Общий подход к компенсации искажений передатчика на стороне приемника

Предлагаемый подход [59, 60] 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, примеры которых приведены на рисунках 4.3 и 4.4. 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.

Примеры гистограмм принимаемых сигналов с модуляцией 16QAM, полученные до и после применения двумерной гауссовской фильтрации, показаны на рисунках 4.5а и 4.5б, соответственно.

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 приемо-передающего оборудования [60]. Наиболее эффективным оказалось применение данного алгоритма для демодуляции и декодирования сигналов с модуляцией 16QAM и высокой скоростью кодирования 3/4. Результаты измерений вероятностей блоковых ошибок в 11 сериях экспериментов для этого случая приведены в таблице 4.1 при использовании адаптивного алгоритма компенсации и без него.

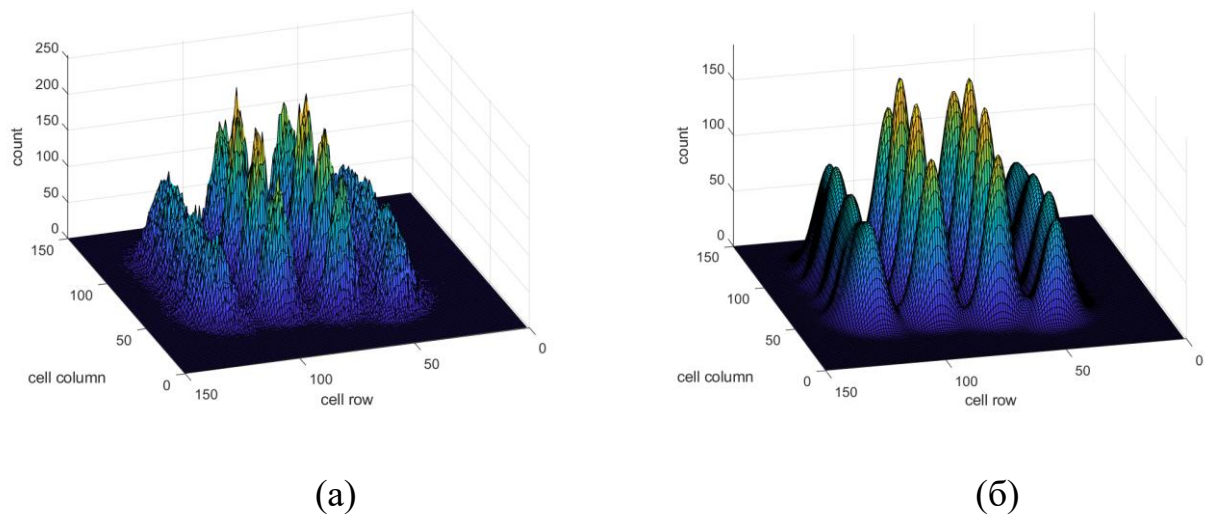


Рисунок 4.5 – Примеры гистограмм модулированных сигналов до (а) и после (б) применения двумерной гауссовской фильтрации

Таблица 4.1 – Результаты измерений вероятностей блоковых ошибок

Номер эксперимента	BLER без адаптации	BLER с адаптацией
0	0,080	0,053
1	0,147	0,062
2	0,089	0,067
3	0,098	0,049
4	0,076	0,053
5	0,111	0,058
6	0,124	0,053
7	0,116	0,071
8	0,102	0,049
9	0,156	0,071
10	0,147	0,053
Среднее по всем экспериментам	0,113	0,058

Как видно из таблицы 4.1, применение предложенного адаптивного алгоритма демодуляции и декодирования сигналов в радиоприемнике при одинаковых условиях передачи позволило снизить вероятность пакетных ошибок приблизительно в два раза.

По сравнению с известными схемами предварительного искажения (предискажения) сигналов в радиопередатчике предлагаемый самообучающийся

алгоритм демодуляции и декодирования в радиоприемнике демонстрирует гораздо меньшую сложность и поэтому может быть рекомендован для применения в приемо-передающем оборудовании небольших и дешевых релейных станций.

4.3. Результаты компьютерного моделирования

Для оценки эффективности описанного выше самообучающегося алгоритма был создан симулятор физического уровня, основные параметры которого приведены в таблице 4.2. Для сравнения работы алгоритма в одинаковых условиях при проведении эксперимента [60] и при проведении компьютерного имитационного моделирования в симулятор физического уровня была добавлена поддержка матриц LDPC кодов из стандарта Wi-Fi IEEE 802.11ad, а также модуляции сигнальной волны SC-FDE.

Таблица 4.2 – Параметры исследуемой системы связи

Параметр	Значение
Несущая частота	60 ГГц
Полоса частот	800 МГц
Модуляция сигнальной волны	SC-FDE
Схема канального кодирования	LDPC Wi-Fi IEEE 802.11ad
Тип декодера	Layered belief propagation
Количество итераций декодера	25
Модуляция	16QAM
Скорость кодирования	3/4
Параметры модели дисбаланса I/Q компонент	$\Delta\varphi$: 10, 20, 30 градусов
Параметры модели усилителя мощности	$q=1; s = 1/2; Sat = A_{sat}/A_{eff} = 1/2; 1; 2$
Схема оценки канала	MMSE

Рисунки 4.6, 4.7, 4.8 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 $R = 0,75$. Красные кривые соответствуют вероятности блоковой ошибки в случае без использования схемы компенсации; зеленые кривые соответствуют вероятности блоковой ошибки в случае с применением схемы компенсации.

На рисунке 4.6 представлены результаты моделирования для случая дисбаланса I/Q компонент на стороне передатчика. Кривые вероятности блоковой ошибки показаны для трех значений фазового сдвига $\Delta\varphi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$. Из рисунка 4.6 видно, что самообучающийся алгоритм компенсации искажений почти идеально компенсирует дисбаланс I/Q компонент для всех значений сдвига фазы.

На рисунке 4.7 представлены результаты моделирования для случая нелинейности усилителя мощности на передатчике. Кривые вероятности блоковой ошибки показаны для коэффициента гладкости $s = 0,5$ (см. рисунок 4.2) и трех уровней насыщения $Sat = 1/2, 1$ и 2 . Из рисунка 4.7 видно, что уровень компенсации искажений из-за нелинейности усилителя мощности не так высок, как для дисбаланса I/Q компонент. Это можно объяснить выбранной сложной для компенсации конфигурацией модели искажений усилителя мощности, т.е. коэффициентом сглаживания $s = 0,5$. По этой причине заметный уровень компенсации, около 1,3 дБ, наблюдается только при низком уровне насыщения $Sat = 0,5$. Для более высоких уровней насыщения уровень компенсации относительно невелик: около 0,6 дБ для $Sat = 1$ и всего 0,2 дБ для $Sat = 2$.

На рисунке 4.8 представлены результаты моделирования, когда на стороне передатчика присутствуют оба типа нелинейных искажений, т.е. как нелинейность на усилителе мощности, так и дисбаланс I/Q компонент. Кривые вероятности блоковой ошибки показаны для коэффициента гладкости $s = 0,5$, трех значений сдвига фазы $\Delta\varphi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$ и трех уровней насыщения $Sat = 1/2, 1$ и 2 , соответственно. Из рисунка 4.8 видно, что предложенный алгоритм компенсации демонстрирует заметное улучшение производительности, примерно на 5,4 дБ,

1,7 дБ и 0,4 дБ, соответственно, благодаря почти идеальной компенсации дисбаланса I/Q компонент сигнала в общем искажении.

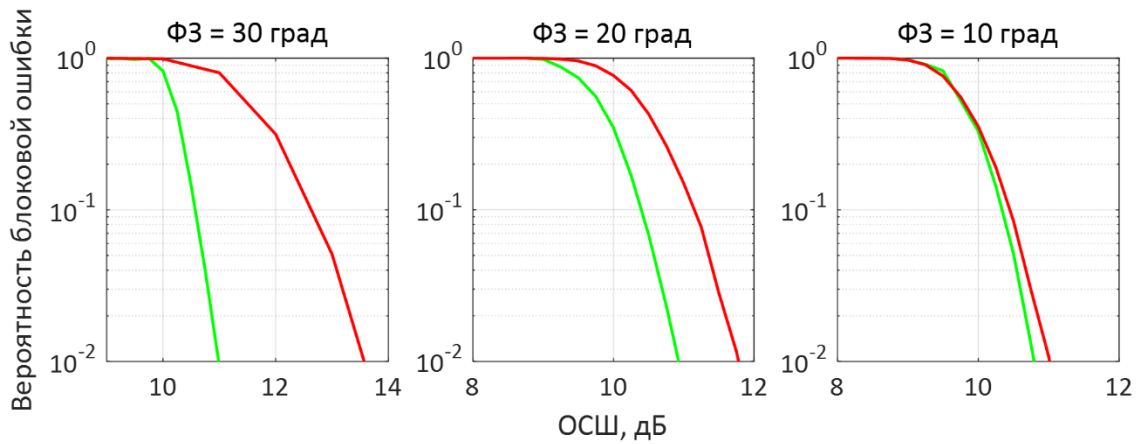


Рисунок 4.6 – Эффективность компенсационного алгоритма для $\Delta\varphi = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$

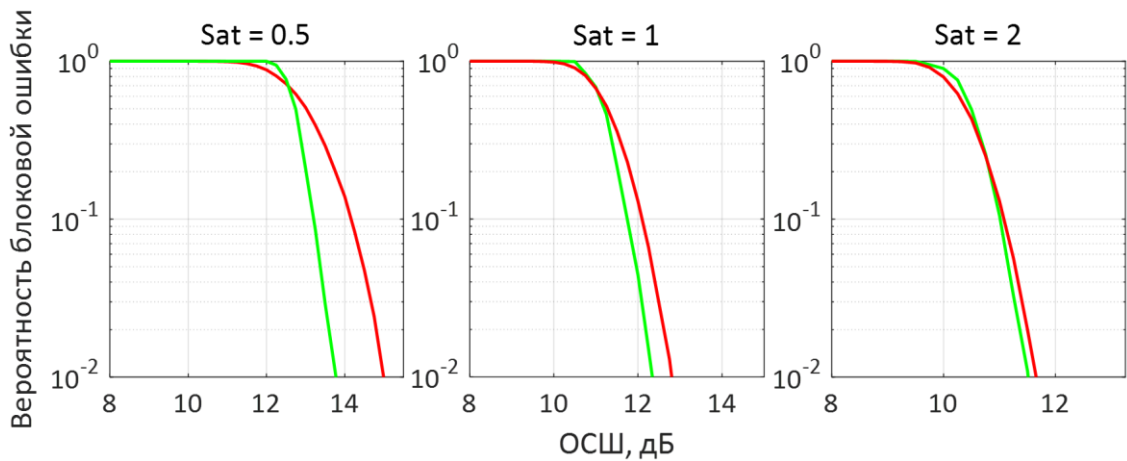


Рисунок 4.7 – Эффективность компенсационного алгоритма для $Sat = 0.5, 1$ и 2

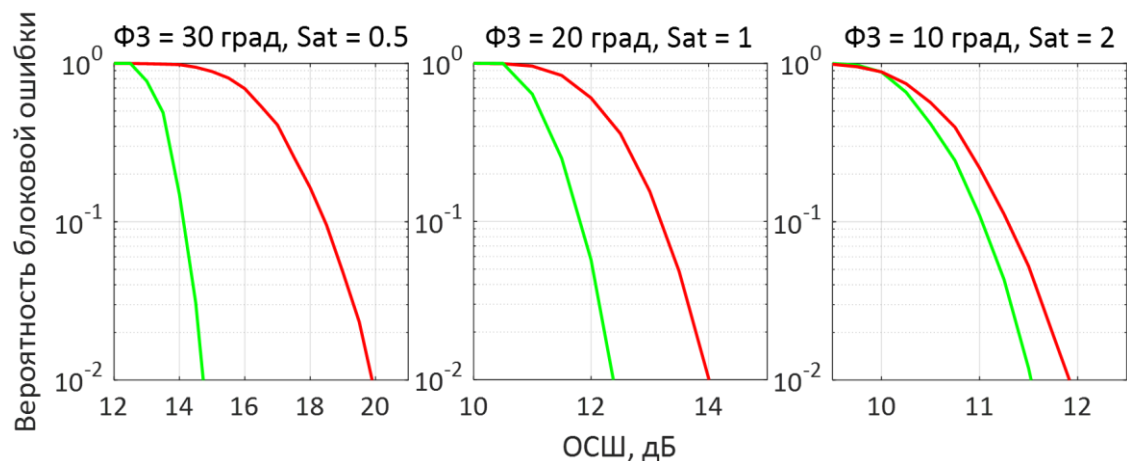


Рисунок 4.8 – Эффективность компенсационного алгоритма для комбинаций $\Delta\varphi = 30^\circ, Sat = 0,5; \Delta\varphi = 20^\circ, Sat = 1; \Delta\varphi = 10^\circ, Sat = 2$

4.4. Выводы

В Главе 4 был предложен и исследован новый метод компенсации нелинейных искажений, возникающих на стороне передатчика, путем обработки на стороне приемника для систем беспроводной связи. Метод основан на прямом статистическом анализе принятых символов данных для оценки искажения и использования этих оценок в процессе демодуляции и декодирования.

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. 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.

Заключение

В настоящей диссертационной работе были предложены методы и алгоритмы повышения энергоэффективности и помехоустойчивости (снижения вероятности пакетных ошибок) в системах мобильной связи пятого поколения.

Основные результаты диссертационной работы и следующие из них теоретические и практические выводы могут быть сформулированы следующим образом:

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.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, профессору, доктору физико-математических наук Мальцеву А.А. за помощь и содействие в подготовке настоящей диссертационной работы.

Список литературы

1. ITU-R, Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s) – ITU-R Report M.2410-0 – 2017.
2. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology // Academic Press – 2018.
3. G. Ermolaev, MU-MIMO and CSI Feedback Performance of NR/LTE / B. Mondal, V. Sergeev, A. Sengupta, G. Ermolaev, A. Davydov, E. Kwon, S. Han, A. Papathanassiou // 2019 53rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS) – 2019 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/CISS.2019.8692922.
4. ITU, Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges // 2018.
5. S. Herrería-Alonso, Adaptive DRX Scheme to Improve Energy Efficiency in LTE Networks with Bounded Delay/ S. Herrería-Alonso, M. Rodríguez-Pérez, M. Fernández-Veiga and C. López-García // in IEEE Journal on Selected Areas in Communications – vol. 33 – no. 12 – pp. 2963-2973, 2015, DOI: 10.1109/JSAC.2015.2478996.
6. H. C. Wang, Power saving by LTE DRX mechanism using a mixture of short and long cycles / H. C. Wang, C. C. Tseng, G. Y. Chen, F. C. Kuo and K. C. Ting // 2013 IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013) – 2013 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/TENCON.2013.6719041.
7. P. Arunagiri, G. Nagarajan, Optimization of power saving and Latency in LTE network using DRX mechanism // 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO) – 2016 – pp. 1-4 – DOI: 10.1109/ISCO.2016.7727036.
8. M. Matin, M. I. Hossain, A New Adaptive Discontinuous Reception (DRX) Model for Power Saving in LTE System // 2019 22nd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) – 2019 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/ICCIT48885.2019.9038573.

9. H. Ramazanali, A. Vinel, Tuning of LTE/LTE-A DRX parameters // 2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD) – 2016 – pp. 95-100 – DOI: 10.1109/CAMAD.2016.7790337.
10. 3GPP, Study on NR coverage enhancements, TR 38.830 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2020.
11. R. D. Mardian, Measuring Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) on 5G Technology: A Review / R. D. Mardian, M. Suryanegara, K. Ramli // 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD) – 2019 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074681.
12. M. Agiwal, Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey / M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena // in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 2016, DOI: 10.1109/COMST.2016.2532458.
13. Алзагир, А.А., Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений / А.А Алзагир, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь – 2022 – DOI: 10.34832/ELSV.2022.31.6.001.
14. 3GPP, On VoIP Uplink Coverage for LTE // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – R1-080339 – 2008.
15. L. Cao et al., VoLTE coverage improvement by HARQ and RLC segmentation when TTI bundling is ON // 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference – 2016 – pp. 371-375 – DOI: 10.1109/ITNEC.2016.7560384.
16. P. Annamalai, Constellation Constraining-Based Coverage Enhancement Technique for MTC Devices in LTE-A / P. Annamalai, J. Bapat and D. Das //in IEEE Wireless Communications Letters – 2016 – vol. 5 – no. 6 – pp. 596-599 – DOI: 10.1109/LWC.2016.2604244.
17. P. Annamalai, Coverage Enhancement for MTC Devices Using Reduced Search Viterbi Decoder Across RATs / P. Annamalai, J. Bapat and D. Das // in IEEE

- Communications Letters, 2016 – vol. 20 – no. 9 – pp. 1892-1895 – DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2587862.
18. S. Yang, TTI bundling enhancements for medium data rate PUSCH in LTE-Advanced systems / S. Yang, P. Chen, X. She and Y. Liu // 9th International Conference on Communications and Networking in China – 2014 – pp. 58-62 – DOI: 10.1109/CHINACOM.2014.7054259.
 19. Y. Zhou, LTE Uplink Coverage Enhancement Techniques Based on Enhanced TTI Bundling / Y. Zhou, T. Zhang, Z. Zeng, Y. Li and Y. Han // 2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing – 2012 – pp. 1-4 – DOI: 10.1109/WiCOM.2012.6478568.
 20. Z. Guo, 5G NR Uplink Coverage Enhancement Based on DMRS Bundling and Multi-slot Transmission / Z. Guo, D. Chen and Y. Yuan // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT) – 2020 – pp. 482-486 – DOI: 10.1109/ICCT50939.2020.9295747.
 21. G. Koteswara Rao, Enhanced Transport Block Processing for 5G NR PUSCH Coverage Enhancement / G. Koteswara Rao, S. Kumawat, S. Amuru, K. Kuchi // 2021 National Conference on Communications (NCC) – 2021 – pp. 1-6 – DOI: 10.1109/NCC52529.2021.9530122.
 22. Y. Song, Adaptive Digital Beamforming for Uplink Coverage Enhancement in 5G NR System / Y. Song, S. Lim, S. Lee, and J. Jang // 27th Telecommunications Forum (TELFOR) – 2019 – pp. 1-4 – DOI:10.1109/TELFOR48224.2019.8971225.
 23. H. Zhang, Research on Coverage Enhancement Scheme of 5G Wireless Network based on Relay // Mobile Communication – 2019 – pp. 31-35.
 24. F. Liu, Analysis of Key Technologies for 5G Uplink Coverage Enhancement / F. Liu, J. Wang, C. Zhao, J. Yang // Mobile Communication – 2018 – pp. 199-202.
 25. N. Li, Coverage Enhancement for 5G NR Networks: Solutions, Specification Impact and Performance Analysis / N. Li, H. Yin, J. Zhu, J. Guo and X. She // 2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC) – 2021 – pp. 2244-2248 – DOI: 10.1109/ICCC54389.2021.9674244.

26. 3GPP, NR; Physical channels and modulation, TS 38.211 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2018.
27. J. de Mingo, A. Valdovinos, Performance of a new digital baseband predistorter using calibration memory // in IEEE Transactions on Vehicular Technology – 2001 – vol. 50 – no. 4 – pp. 1169-1176 – DOI: 10.1109/25.938591.
28. A. Adhikary et al., Joint Spatial Division and Multiplexing — The Large-Scale Array Regime // IEEE Trans. Info. Theory – 2013 – vol.59 – no. 10 – pp. 6441–63.
29. R. Marsalek, From post-distortion to pre-distortion for power amplifiers linearization / R. Marsalek, P. Jardin and G. Baudoin // in IEEE Communications Letters – 2003 – vol. 7 – no. 7 – pp. 308-310 – DOI: 10.1109/LCOMM.2003.814714.
30. A. Maltsev, Power amplifier linearization methods and apparatus using predistortion in the frequency domain / A. Maltsev, A. Sadri, O. Poldin, A. Jr. Maltsev, S. Purtsezov // U.S. Patent US20060008028 – 2008.
31. J. Kim, A Robust Companding Scheme against Nonlinear Distortion of High Power Amplifiers in OFDM Systems / J. Kim, S. Han and Y. Shin // VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference – 2008 – pp. 1697-1701– DOI: 10.1109/VETECS.2008.390.
32. R. Sperlich, Closed-loop digital pre-distortion for power amplifier linearization using genetic algorithms / R. Sperlich, J. A. Sills and J. S. Kenney // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest – 2003 – pp. 347-350 – vol.1 – DOI: 10.1109/MWSYM.2003.1210949.
33. B. Pavel, Nonlinear Distortion in a Microwave High Power Amplifier / B. Pavel, D. Matoušek and L. Rejtek // 2019 29th International Conference Radioelektronika – 2019 – pp. 1-4 – DOI: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733505.
34. J. Tellado, Maximum-likelihood detection of nonlinearly distorted multicarrier symbols by iterative decoding / J. Tellado, L. M. C. Hoo and J. M. Cioffi // in IEEE Transactions on Communications – 2003 – vol. 51 – no. 2 – pp. 218-228 – DOI: 10.1109/TCOMM.2003.809289.

35. F. Gregorio, Receiver Cancellation Technique for Nonlinear Power Amplifier Distortion in SDMA–OFDM Systems / F. Gregorio, S. Werner, T. I. Laakso and J. Cousseau // in IEEE Transactions on Vehicular Technology – 2007 – vol. 56 – no. 5 – pp. 2499-2516 – DOI: 10.1109/TVT.2007.899965.
36. N. A. Vu, A LUT-based LNA Nonlinear Distortion Compensation Scheme in Direct-Sampling Receivers / N. A. Vu, H. N. Le, T. H. T. Tran, V. P. Hoang, Q. K. Trinh // 2020 IEEE Eighth International Conference on Communications and Electronics (ICCE) – 2021 – pp. 24-29 – DOI: 10.1109/ICCE48956.2021.9352138.
37. M. Valkama, Advanced methods for I/Q imbalance compensation in communication receivers / M. Valkama, M. Renfors and V. Koivunen // in IEEE Transactions on Signal Processing – 2001 – vol. 49 – no. 10 – pp. 2335-2344 – DOI: 10.1109/78.950789.
38. 3GPP, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, TR38.901 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2019.
39. 3GPP, LTE physical layer framework for performance verification // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP). R1-070674 – 2007.
40. Q. Ye, H. He, T. Islam, G. Ermolaev, Physical Downlink Control Channel Based Wake Up Signal – U.S. patent US20220182938 – 2020.
41. T. Islam, H. He, G. Ermolaev, Downlink Control Channel Signaling for Improved Power Consumption at a User Equipment (UE) – U.S. patent US20210176762 – 2020.
42. Q. Ye, H. He, T. Islam, G. Ermolaev, Cross-slot Scheduling Power Saving Techniques – U.S. patent US20220210736 – 2022.
43. Ермолаев, Г.А., Алгоритмы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G NR. Часть I / Г.А. Ермолаев // Электросвязь – 2023 – № 11 – с. 70–74.
44. Ермолаев, Г.А., Алгоритмы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G NR. Часть II / Г.А. Ермолаев // Электросвязь – 2024 – № 1 – с. 37–42.

45. 3GPP, NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception, TS 38.101 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2018.
46. 3GPP, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, TR 38.901 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2019.
47. 3GPP, Study on User Equipment (UE) power saving in NR, TR 38.840 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2019.
48. 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.
49. T. Islam, H. He, Q. Ye, G. Ermolaev, System and Method of Adaptation of Reference Signal (RS) Monitoring for User Equipment (UE) Power Saving – U.S. patent US20220124622 – 2020.
50. G. Xiong, S. Sosnin, G. Ermolaev, J. Zhu, Enhanced Inter-Slot Frequency Hopping for Uplink Coverage in 5G Systems – PRC patent CN116601898 – 2023.
51. G. Xiong, S. Sosnin, G. Ermolaev, J. Zhu, A. Sengupta, A. Davydov, Coverage Enhancement for Physical Uplink Control Channel Transmissions in New Radio – US patent US20210298048 – 2021.
52. G. Xiong, S. Sosnin, G. Ermolaev, J. Zhu, D. Chatterjee, Time-Domain Resource Allocation for Transport Block Over Multiple Slot (TBoMS) Transmissions – PRC patent CN116830508 – 2023.
53. 3GPP, NR; Multiplexing and channel coding, TS 38.212 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2018.
54. 3GPP, NR; Physical layer procedures for control, TS 38.213 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2018.
55. 3GPP, NR; Physical layer procedures for data, TS 38.214 // Published by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – 2018.

56. C. Rapp, Effects of HPA-nonlinearity on 4-DPSK-OFDM-signal for a digital sound broadcasting system // Proc. 2nd European Conference Satellite Communications – 1991.
57. Evaluation methodology of IEEE 802.11ad.
58. Evaluation methodology of IEEE 802.11ay.
59. G. Ermolaev, 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.
60. Болховская, О.В., 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

Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертации



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования

**«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»
(ННГУ)**

Гагарина пр., 23, г. Нижний Новгород,
Россия, ГСП-20, 603022
Тел. (831)462-30-90 Факс (831)462-30-85
e-mail: unn@unn.ru



УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по науке и инновациям
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

М.Ю. Грязнов

дд. 09. 2023 № 06. 49-09-429-1/23
на № _____ от _____

АКТ

о внедрении научных результатов,
полученных Ермолаевым Григорием Александровичем

Комиссия в составе:

- Флаксмана Александра Григорьевича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи;
- Болховской Олеси Викторовны, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи;
- Осинкиной Марии Михайловны, инженера II-ой категории кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Ермолаевым Григорием Александровичем, а именно:

- 1) методы улучшения энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи пятого поколения (5G);
- 2) схема мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи для снижения порога помехоустойчивости систем связи пятого поколения;
- 3) метод борьбы на стороне приемника с нелинейными искажениями, вызванными на передатчике

использованы при выполнении научно-исследовательской работы: «Разработка технологий гибридного сканирования луча для многоэлементных антенн с высоким коэффициентом усиления в диапазоне частот 5-6 ГГц» (Хоздоговорные и инициативные НИОКР). № темы: 018/П.

Профессор кафедры статистической
радиофизики и мобильных систем связи,
д. ф.-м. н.



А.Г. Флаксман

Доцент кафедры статистической
радиофизики и мобильных систем связи,
к. ф.-м. н.



О.В. Болховская

Инженер II-ой категории кафедры
статистической радиофизики и
мобильных систем связи



М.М. Осинкина