Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет Кафедра радиофизики

> ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК Руководитель ООП д-р. физ.-мат. наук ______ Д.Я. Суханов «_22»____ 6_____ 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ 5G NR»

по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы»

Жаринов Вячеслав Федорович

Руководитель ВКР канд. физ.-мат. наук, доцент

О.Г. Пономарев UTOHL 2023 г. >>

Научный консультант аспирант каф. радиофизики НИ ТГУ

M. Acaф » Upothe 2023 г. «12

Автор работы студент группы № ____072171 В.Ф. Жаринов 2» Utothe 2023 r.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет Кафедра радиофизики

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП д-р. физ.-мат. наук DI _Д.Я. Суханов «28» 09 20 2/г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы магистра обучающемуся Жаринову Вячеславу Федоровичу

(Ф.И.О. обучающегося)

по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика, направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы

Экспериментальная апробация методов повышения помехоустойчивости систем связи 5G NR

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) на кафедру –	25.05.23
б) в ГЭК –	23.06.23

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования – Методы и алгоритмы генерации и демодуляции сигналов в системах сотовой связи 5G NR.

Предмет исследования	 Помехоустойчивость методов и алгоритмов, реализующих 	
	процедуры физического уровня в системах сотовой связи 5G	
	NR.	
Цель исследования –	Экспериментальное исследование помехоустойчивости систем связи 5G NR.	

Задачи:

Обзор литературы: методы и алгоритмы обработки цифровых сигналов на физическом уровне систем связи 5G NR.

Разработка комплекса алгоритмов и программ, реализующих генерацию и демодуляцию сигналов стандарта 5G NR.

Проведение численных экспериментов по генерации и демодуляции сигналов 5G NR.

Проведение экспериментов по передаче и приему сигналов 5G NR с использованием программно-определяемого радио.

Проведение экспериментов по апробации методов повышения помехоустойчивости системы связи 5G с использованием программно-определяемого радио.

Методы исследования

Численное моделирование

Экспериментальная апробация

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа по соглашению с Минобрнауки России от «26» ноября 2019 г. № 075-11-2019-031

(проект «Разработка программно-аппаратного комплекса для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR»).

4. Краткое содержание работы

Методы цифровой обработки сигналов в системах мобильной связи 5G NR (лит. обзор). Комплекс алгоритмов и программ, реализующих генерацию и демодуляцию сигналов

стандарта 5G NR.

Исследование работы 5G NR совместно с источником внешнего шумоподобного сигнала.

Исследование детектора РUCCН нулевого формата. Модификация алгоритма детектора РUCCН нулевого формата.

Руководитель выпускной квалификационной работы Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиофизики РФФ НИ ТГУ

(должность, место работы)

Задание принял к исполнению Студент НИ ТГУ

(должность, место работы)

(подпись)

(подпись)

О.Г. Пономарев

(И.О. Фамилия)

В.Ф. Жаринов

(И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы, приложений А и Б; содержит 82 страницы, 29 рисунков, 33 источника, 5 таблиц.

Объектом исследования диссертации являются методы и алгоритмы генерации и демодуляции сигналов в системах сотовой связи 5G NR. Предметом исследования является помехоустойчивость методов и алгоритмов, реализующих процедуры физического уровня в системах сотовой связи 5G NR.

Ключевые слова: 5G NR, Physical layer, PDSCH, система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией, формирование и демодуляция сигналов стандарта 5G NR, PUCCH нулевого формата, пороговое значение, системы программно-определяемого радио ADALM-PLUTO SDR.

Цель диссертационной работы

Экспериментальное исследование помехоустойчивости систем связи 5G NR.

Задачи

• Обзор литературы: методы и алгоритмы обработки цифровых сигналов на физическом уровне систем связи 5G NR.

• Разработка комплекса алгоритмов и программ, реализующих генерацию и демодуляцию сигналов стандарта 5G NR.

• Проведение численных экспериментов по генерации и демодуляции сигналов 5G NR.

• Проведение экспериментов по передаче и приему сигналов 5G NR с использованием программно-определяемого радио.

• Проведение экспериментов по апробации методов повышения помехоустойчивости системы связи 5G с использованием программноопределяемого радио.

В процессе работы создано программное обеспечение, реализующее процедуры модуляции и кодирования; демодуляции и анализа сигналов

стандарта 5G NR в нисходящем и восходящем канале линии связи. Проведена апробация различных методов и механизмов помехоустойчивости 5G NR в численных и реальных экспериментах.

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Обзор общей концепции и основных положений стандарта 5G NR	. 10
1.1 Эволюция систем связи	. 10
1.2 Поддерживаемые системами связи 5G NR сценарии	. 12
1.3 Ключевые нововведения радиостандарта 5G NR	. 14
1.4 Стек протоколов 5G NR	. 16
1.5 Обзор ключевых компонентов физического уровня 5G NR [9-15]	. 18
1.6 Каналы и сигналы физического уровня 5G NR	. 22
1.7 Начальный доступ абонента к сети	
1.8 Комплекс алгоритмов и программ, реализующих генерацию и формирование сигналов физического уровня стандарта 5G NR	30
1.9 Выводы по главе 1	. 32
2 Исследование помехоустойчивости 5G NR при одновременной работе с системой связи с шумоподобными сигналами	33
2.1 Система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией	. 33
2.2 Формирование канала PDSCH	. 40
2.3 Процедура приема PDSCH	. 44
2.4 Эксперименты по приемопередаче сигнала 5G NR PDSCH	. 52
2.5 Выводы по главе 2	. 60
3 Модификация детектора сигналов РUCCН нулевого формата	
3.1 Сигналы PUCCH нулевого формата	. 61
3.2 Процедура генерации PUCCH нулевого формата	. 62
3.3 Процедура декодирования РИССН нулевого формата	. 64
3.4 Численные эксперименты по апробации предлагаемой методики детектирования	67
3.5 Практические эксперименты по апробации предлагаемой методики детектирования	71
3.6 Выводы по главе 3	. 76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	. 79
ПРИЛОЖЕНИЕ А	. 83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	93

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

5G NR – 5 Generation New Radio, пятое поколение мобильной связи

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов

3GPP – 3rd Generation Partnership Project, консорциум, разрабатывающий спецификации для мобильной телефонии

eMBB – enhanced Mobile BroadBand, улучшенный широкополосный мобильный доступ.

mMTC – massive Machine-Type Communication, массовая межмашинная связь

URLLC – Ultra-Reliable and Low-Latency Communication, сверхнадежная связь со сверхнизкими задержками

BWP – BandWidth Part, часть полосы пропускания

LDPC – Low-Density Parity-Check code, код с малой плотностью проверок на чётность

SSBlock – Signal Synchronization Block, блок синхросигналов

FR – Frequency Range, диапазон несущих

MIMO – Multiple Input Multiple Output, системы из множества передающих и приемных антенн

RRC – Radio Resource Control, протокол управления радиоресурсами

SDAP – Service Data Adaptation Protocol, протокол адаптации служебных данных

PDCP – Packet Data Convergence Protocol, протокол конвергенции пакетных данных

RLC – Radio Link Control, протокол контроля радиосоединения

MAC – Medium Access Control, протокол контроля доступа

HARQ – Hybrid Automatic Repeat Request, гибридный автоматический повтор запросов

PHY – Physical layer, физический уровень

QPSK – квадратурная фазовая модуляция

QAM – квадратурная амплитудная модуляция

BPSK – Binary Phase Shift Keying, двоичная фазовая манипуляция

gNB – базовая станция

UE – User Equipment, пользовательское оборудование

DM-RS – Demodulation Reference Signal, опорный сигнал демодуляции

PT-RS – Phase Tracking Reference Signal, опорный сигнал отслеживания фазы

CSI-RS – Channel State Information Reference Signal, опорный сигнал для оценки качества в нисходящей линии связи

SRS – Sounding Reference Signal, зондирующий сигнал в восходящей линии

PSS – Primary Synchronization Signal, начальный сигнал синхронизации

SSS – Secondary Synchronization Signal, вторичный сигнал синхронизации

PBCH – Physical Broadcast Channel, физический канал вещания

PDCCH – Physical Downlink Control Channel, физический нисходящий управляющий канал

DCI – Downlink Control Information, управляющая информация в нисходящей линии связи

PDSCH – Physical Downlink Shared Channel, физический нисходящий общий канал

PRACH – Physical Random Access Channel, физический канал произвольного доступа

PUCCH – Physical Uplink Control Channel, физический восходящий управляющий канал

UCI – Uplink Control Information, управляющая информация в восходящей линии связи

SR – Scheduling Request, запрос планирования

PUSCH – Physical Uplink Shared Channel, физический восходящий общий канал

CORESET – Control Resource Set, набор ресурсов управления

CRC – Cyclic Redundancy Check, циклический избыточный код

RV – Redundancy Version, версия избыточности

LOS – Line Of Sight, передача в режиме прямой видимости

CDL – Clustered Delay Line, кластеризованная линия задержки

TDL – Tapped Delay Line, линия задержки с ответвлениями

SDR – Software-Defined Radio, программно-определяемое радио

EVM – Error Vector Magnitude, величина вектора ошибки

BER – Bit Error Rate, частота ошибок по битам

введение

5G – это новейший телекоммуникационный стандарт связи, который должен вывести функциональные возможности систем мобильной связи на принципиально иной уровень. Характеристики систем связи 5G, намеченные разработчиками радиостандарта 5G New Radio, должны включать высочайшие скорости передачи данных (значительно больше 1 Гбит/с), огромную плотность подключений (вплоть до 1 млн на км²), высокую мобильность и сверхмалые задержки (менее 1 миллисекунды). Эти преимущества позволят решать множество новых задач, предъявляющих высокие требования к скорости передачи и надежности соединения в режиме реального времени.

Системы связи пятого поколения ориентированы не только на обеспечение постоянно растущих нужд человека, но и на поддержку машинноориентированных приложений. В исследованиях шведского производителя телекоммуникационного оборудования Ericsson выделяется как минимум 200 вариантов использования систем связи 5G в производстве, здравоохранении, энергетике, коммунальной сфере, сервисах медиа и развлечениях, транспорте, сельском хозяйстве, торговле, общественной безопасности, финансовых услугах [1]. С другой стороны, широкие функциональные возможности и специфический набор предъявляемых требований делают внутреннюю организацию радиостандарта нового поколения чрезвычайно сложной, и потому требуют огромного объема научных исследований.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Применение при приеме PUCCH нулевого формата модификации алгоритма детектирования, основанной на использовании относительного уровня сигнала на выходе согласованного приемника при пороговом значении L = 4, позволяет достичь требуемых стандартами 5G NR значений вероятностей «ложной тревоги» и «пропуска цели».

2. При совместной работе в одной полосе частот системы связи 5G NR и источника внешнего шумового сигнала возможность правильного декодирования сигнала, означающая, согласно стандартам 5G NR,

безошибочный прием 70% передаваемых блоков данных, достигается при уровне отношения сигнал/шум равном 5 дБ, что делает возможным использование сигналов с псевдослучайной модуляцией для передачи дополнительной информации в системе связи 5G NR.

Новизна научных положений, выносимых на защиту

1. Предложено при приеме PUCCH нулевого формата использовать относительный уровень сигнала на выходе согласованного приемника. Проведена экспериментальная апробация, полностью подтвердившая высокую эффективность предложенного метода приема.

2. Экспериментально получены зависимости вероятности безошибочной передачи данных в нисходящем канале системы связи 5G NR от уровня помех, создаваемых внешним источником шума.

Достоверность научных положений, выносимых на защиту, и других результатов

1. Достоверность первого защищаемого положения подтверждается совпадением результатов численных экспериментов, согласующихся с требованиями стандартов 5G NR, и реальных экспериментов со средней погрешностью, равной 5%.

2. Достоверность второго защищаемого положения подтверждается совпадением результатов численных экспериментов для сценария прямой видимости (LOS) и реальных экспериментов с максимальной погрешностью в 4%.

3. При проведении экспериментов использовалось тестовое программное обеспечение, разработанное на кафедре радиофизики НИ ТГУ [2-6]. При разработке данного комплекса программ и алгоритмов, реализующих физический уровень систем связи 5G NR, проводилась проверка правильности работы (верификация), для которой использовалось референсное программное обеспечение, предоставляемое расширением среды для научных расчетов MatLab 5G NR Toolbox.

4. Созданная программная реализация методов и алгоритмов формирования и демодуляции сигналов 5G NR полностью соответствует стандартам 5G NR.

Научная ценность положений 1 и 2

1. Определяется достижением требуемых стандартами 5G NR вероятностей «ложной тревоги» и «пропуска цели».

2. Предложен вариант расширения систем связи 5G NR для передачи дополнительной информации за счет включения в число физических каналов шумоподобных сигналов.

Практическая значимость 2 положения, выносимого на защиту

Численно и экспериментально показано, что вероятность безошибочного декодирования, заданная в стандартах величиной в 70% от числа всех передаваемых блоков данных, достигается по уровню 5 дБ.

Внедрение результатов работы

Созданный комплекс алгоритмов и программ является программной частью программно-аппаратного комплекса для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR, разработанного совместно сотрудниками кафедры радиофизики НИ ТГУ и сотрудниками «АО «НПФ Микран».

Проекты и гранты

Соглашение с Минобрнауки России от «26» ноября 2019 г. № 075-11-2019-031 (проект «Разработка программно-аппаратного комплекса для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR»). Рук. Пономарев О.Г.

Диссертация состоит из трех глав. В первой главе приводится краткая история развития в области систем связи, предопределившая появление систем пятого поколения. Описываются основные варианты применения систем связи 5G NR, подтверждающие их актуальность и востребованность, приводятся отличия от систем предыдущего поколения. Рассматриваются все этапы преобразования информации в стеке протоколов 5G NR, особо выделяется физический уровень как основной во всей системе связи. Приводится описание всех физических каналов и сигналов, в соответствии с

которым разработан комплекс алгоритмов и программ, реализующих генерацию и демодуляцию сигналов стандарта 5G NR.

Вторая глава посвящена исследованию работы 5G NR совместно с источником внешнего шумоподобного сигнала. В рамках этой работы рассматриваются передающая и приемная части системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией. Описываются механизмы и методы формирования и приема физического канала PDSCH. Излагается ход проведения численных и практических экспериментов, результаты которых отражены во втором защищаемом положении.

В третьей главе рассматриваются сигналы РUCCH нулевого формата; описывается определенная стандартами 3GPP процедура их детектирования, для исследования которой проводится ряд численных экспериментов. Предлагается модификация этого алгоритма, для проверки эффективности которой проводится ряд численных и реальных экспериментов, на чем базируется первое защищаемое положение.

1 Обзор общей концепции и основных положений стандарта 5G NR

1.1 Эволюция систем связи

Начало эры мобильной связи приходится на 1970 – 1980-е годы и связано с возникновением систем связи 1G (от англ. Generation – поколение), базирующихся на аналоговом способе передачи информации. Сильная подверженность аналоговых сигналов помехам и интерференции, сложность их восстановления на приемной стороне приводили к существенным трудностям. В конечном счете, применение аналоговых сигналов существенно ограничивало функциональные возможности системы связи в целом: при довольно малых скоростях передачи информация могла передаваться лишь в голосовом и незащищенном виде. В то же время, сами приемопередающие устройства были необычайно громоздкими. Все перечисленные недостатки первого поколения предопределили дальнейшее развитие систем связи, выразившееся в появлении систем связи 2G. В системах второго поколения аналоговая передача информация совмещалась с цифровой, благодаря чему помимо передачи голосовой информации при использовании цифровых методов в ограниченном формате стала возможной передача данных (текстовые сообщения). Как раз с возникновением систем связи 2G связывают моменты зарождения цифровой радиосвязи и начала массового использования телекоммуникационного оборудования. Стандарт GSM (от англ. Groupe Special Mobile), закладывающий основу цифровых методов передачи информации, стал главной технологией систем связи второго поколения. В ходе дальнейшей разработки появилось в промежуточное поколение 2.5G, дополненное технологиями кодового разделения абонентов (от англ. CDMA) и пакетной коммутации данных (от англ. GPRS). С 2.5G принято связывать первые попытки выхода в Интернет. Однако в полной мере обеспечить пользователям мобильных устройств доступ в Интернет удалось только в третьем поколении мобильной связи, появившемся в начале 2000-х годов. Усовершенствование ранее внедренной технологии пакетной передачи

данных (HSPA, High Speed Packet Access) позволило на порядки увеличить скорость передачи информации.

Современное нам 4 поколение, представленное стандартом LTE (от англ. Long-Term Evolution), отличают технология OFDM-модуляции (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), принципиально иная структура радиоинтерфейса, идея частотно-временного разделения нисходящих и восходящих радиоканалов, пришедшая на смену кодовому разделению CDMA. Ha первых порах после внедрения И полномасштабного развертывания 4G системы мобильной связи полностью соответствовали предъявляемым требованиям. Однако по прошествии нескольких лет отчетливо наметился предел возможностей стандарта LTE даже при условии дальнейшей эволюции в виде неограниченного роста трафика, его потребностей абонентов, запросов времени и появления новых, недоступных вариантов использования.

Чтобы удовлетворить более широкому набору технических требований, продиктованных временем и навеянных влиянием прогресса, была инициирована разработка нового радиостандарта пятого поколения.

Этап возникновения систем связи пятого поколения, совпадает с наметившейся общей тенденцией, связанной с появлением стандартов следующего поколения примерно каждое десятилетие. Наглядным примером актуальности 5G является концепция цифровой экономики, основу которой составляют цифровые компьютерные технологии, а также новые методы генерирования, передачи, обработки и хранения информации. Цифровизация модернизацию всей информационной экономики предполагает инфраструктуры, одним из главенствующих и определяющих звеньев которой являются системы связи. Таким образом, актуальность исследований в области систем связи пятого поколения, появление которых является закономерным этапом развития систем мобильной связи, не вызывает сомнений.

1.2 Поддерживаемые системами связи 5G NR сценарии

В связи с возникшей необходимостью дальнейшего развития систем сотовой связи консорциумом 3GPP (от англ. 3rd Generation Partnership Project), разрабатывающим ранее стандарты 3G и 4G, с 2012 года обсуждались технологии-кандидаты для систем пятого поколения и активно велись работы по созданию стандартов 5G NR (от англ. New Radio). В состав консорциума входят 7 национальных организаций по разработке стандартов, базирующихся во Франции (ETSI), Японии (ARIB и TTC), США (ATIS), Китае (CCSA), Корее (TTA) и Индии (TSDSI).

Первым этапом стандартизации стал релиз 3GPP NR Release 15, выпущенный в 2017 году и объединивший все разработанные стандарты в единый радиоинтерфейс New Radio. Впоследствии 3GPP было выпущено еще 2 обновленных версии стандартов: 3GPP NR Release 16 и 3GPP NR Release 17. В стандартах задается общее направление развития и работы системы связи, определяются системные и глобальные требования к радиоинтерфейсу, регламентируется архитектура радиоинтерфейса в целом и всех его компонентов и процедур в отдельности, определяются условия тестирования и верификации. Изложенная в стандартах общая информация, с точки зрения конечного абонента, в первую очередь, свидетельствует не только о количественном, но и о качественном расширении функционала системы связи по сравнению с предыдущим поколением.

К числу ожидаемых характеристик систем пятого поколения разработчики стандартов относят высочайшие пиковые скорости передачи данных: 10 Гбит/с в восходящей и 20 Гбит/с в нисходящей линии связи; огромную плотность подключений, которая может достигать до 1 млн устройств на км²; сверхмалые задержки – менее 1 мс; большие скорости передвижения абонента – вплоть до 500 км/ч.

На рисунке 1 иллюстрируются сценарии использования, покрыть которые позволяют характеристики 5G NR, глазами конечного пользователя.



Рисунок 1 – Сценарии, поддержка которых планируется системами 5G [7]

Таким образом, разработанные 3GPP стандарты направлены на реализацию трех сценариев, которые называются eMBB, mMTC, URLLC; последние два являются принципиально новыми для систем мобильной связи. Ниже описывается каждый сценарий.

1) еМВВ (от англ. enhanced Mobile BroadBand – улучшенный мобильный широкополосный доступ) – основной по степени важности сценарий, соответствующий поступательному развитию систем связи, но в то же время сохраняющий обратную совместимость со стандартами предыдущих поколений. Среди услуг, предоставляемых еМВВ, можно выделить передачу HD-видео, поддержку технологий виртуальной реальности (VR), дополненной реальности (AR) и других сервисов, ориентированных на человека. Наиболее жесткие требования при реализации сценария еMBB накладываются на практическую скорость передачи данных, мобильность, требующую большой устойчивости к эффекту Доплера, плотность покрытия территории.

2) mMTC (от англ. massive Machine-Type Communication – массовая связь машинного типа) – сценарий, отвечающий за массовую реализацию интернета вещей (от англ. IoT). Под massive IoT принято понимать систему из большого числа дешевых (стоимостью, не превышающей 5\$) устройств с низким энергопотреблением и возможностью длительной автономной работы от гальванических элементов в течение нескольких лет. Такими устройствами являются датчики (давления, температуры, расхода, концентрации, пожарной сигнализации, влажности и т.д.), счетчики (газа, воды, электричества),

различные сенсоры. Все эти устройства, предназначенные для таких систем как «умный дом» и «умный город», помимо дешевизны характеризуются также относительно малым объемом передаваемых данных. Поэтому скорость передачи данных для mMTC оказывается не столь существенной, акцент делается на высочайшей плотности подключения устройств.

3) URLLC (от англ. Ultra-Reliable and Low-Latency Communication – сверхнадежная связь с низкими задержками), в англоязычной литературе также встречается термин critical IoT. Данный сценарий относится к межмашинному взаимодействию, как и описанный выше mMTC. URLLC рассчитан на варианты использования, характеризующиеся строгими требованиями к задержке, которая не должна превышать 1 мс, и надежности соединения, И предназначен для промышленной автоматизации И роботизации, телемедицины, беспилотного автотранспорта. Удовлетворить таким требованиям удается за счет использования волн миллиметрового диапазона и, как следствие, микросот с зоной покрытия малых размеров, а также благодаря высокой степени гибкости системы связи.

1.3 Ключевые нововведения радиостандарта 5G NR

Выходные характеристики системы связи 5G NR, во всех отношениях превосходящие аналогичные параметры стандарта предыдущего поколения, достигаются благодаря более гибкой структуре и высокой эффективности. Вклад в это вносят следующие основные улучшения и компоненты.

1) Фиксированное в 4G расстояние между поднесущими частотами, в 5G является переменным и может принимать значения $\Delta f = 2 \cdot 15^{\mu}$ КГц = {15, 30, 60, 12, 240} КГц, где за $\mu = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ обозначена т.н. нумерология. Использование различных значений μ открывает широкие возможности для гибкой настройки параметров в зависимости от качества связи и предъявляемых конкретным сервисом требований.

2) При разработке стандартов 3GPP было учтено, что требовать от всех пользовательских устройств, коими, в том числе, являются обычные мобильные телефоны, декодировать максимальную полосу частот – неразумно

и нерационально. Поэтому в 5G используется механизм адаптации ширины полосы канала связи BWP (от англ. Bandwidth Part – часть полосы пропускания), предполагающий декодирование только части частотновременных ресурсов из заданной области. Основная идея BWP заключается в том, что приемному устройству сообщается, в какой полосе частот и с какими параметрами данное устройство должно работать в данный момент времени. Таких частей полосы в пределах одного радиокадра может насчитываться до 4.

3) Использование новых методов помехоустойчивого кодирования канала: LDPC-кодирование, пришедшее на смену турбокодам с более сложной структурой; полярные коды, обладающие высокой эффективностью в случае кодирования блоков данных малой длины.

4) Передача множества т.н. «always-on» синхросигналов, имевшая место в 4G, максимально урезана и оптимизирована до одного блока компактных размеров SSBlock (от англ. Synchronisation Signal Block). Весьма ограниченная полоса задействованных частот и низкий коэффициент заполнения делают блок SS максимально емким и экономным.

Физически реализация описанных программных опций возможна благодаря переходу на существенно более высокие несущие частоты. Стандарты 3GPP определяют 2 группы радиочастот: FR1 (410 – 7125 МГц) и FR2 (24250 – 52600 МГц), выбор между которыми осуществляется в зависимости от сценария использования. В свою очередь, каждая группа делится на ряд поддиапазонов частот, которые могут быть расширены и дополнены новыми поддиапазонами; например, существуют перспективы расширения верхней границы FR2 вплоть до 100 ГГц.

Волны диапазона FR1 характеризуются наилучшим распространением как в городской среде в условиях многократных отражений, так и в менее насыщенной препятствиями сельской местности, и, как следствие, повсеместно используются в системах связи. Для развертывания в диапазоне FR1 задействуются соты больших размеров.

Использование частот FR2, включающих волны миллиметрового диапазона, является новым и позволяет передавать сигналы с разнесением поднесущих равным $\Delta f = 240$ КГц и экстремальной полосой частот, ширина которой может достигать 400 МГц, что особенно важно при реализации URLLC. С другой стороны, применение FR2 куда менее выгодно с точки зрения потерь и затухания при распространении, поэтому эти частоты выделяются для организации связи на относительно короткие расстояния (микросоты). Кроме того, акцент делается на использовании больших массивов антенн МІМО, работающих в режиме пространственного мультиплексирования.

1.4 Стек протоколов 5G NR

Для того, чтобы проиллюстрировать место используемого в данном исследовании физического уровня 5G NR, кратко рассмотрим всю структуру систем пятого поколения, в которой можно выделить две основные составляющие: ядро сети (Core Network) и Radio-Access Network (RAN), технологию, отвечающую за радиодоступ. В ядро сети, напротив, вынесены все функции, не связанные с радиодоступом: аутентификация пользователя сетью и сети пользователем, защита и безопасность данных, шифрование и контроль целостности сигнального и пользовательского трафика. Отделение всех процедур ядра сети от технологии радиодоступа позволяет, во-первых, обслуживать несколько технологий радиодоступа одной и той же базовой сетью. Во-вторых, дает возможность виртуализировать выполнение сетевых функций (Network Functions Virtualization) [8].

Передаваемая информация в 5G NR по своему назначению может быть разделена на два типа: Control Plane (управляющую) и User Plane (пользовательскую). Пользовательская или абонентская часть отвечает за доставку пользовательских данных, управляющая часть обеспечивает установление связи, мобильность, коррекцию ошибок и защищенность системы связи.

На первом этапе ядро сети, работу которого определяет функция AMF (Access and Mobility Management Function), осуществляет процесс регистрации пользователя путем установления первичного незащищенного соединения NAS (Non-Access-Stratum). Функция AMF управления доступом и мобильностью, являющаяся основным сетевым компонентом ядра сети, взаимодействует с другими сетевыми функциями, такими как UPF (функция уровня пользователя), SMF (функция управления сеансом) и AUSF (функция сервера аутентификации).

Дальнейшее взаимодействие осуществляется в рамках RAN между пользователем и базовой станцией и подразделяется на 3 уровня (L1, L2, L3), которые демонстрируются на упрощенной блок-схеме, изображенной на рисунке 2.



Рисунок 2 – Стек протоколов User Plane и Control Plane на стороне пользовательского оборудования (UE), базовой станции (gNB) и ядра сети

На уровне L1 для управляющей плоскости протокол RRC (от англ. Radio Resource Control) формирует набор параметров, позволяющих обеспечить абоненту доступ к радиоинтерфейсу и сообщить о выбранной стратегии управления радиоресурсами; пользовательская часть на уровне L1 преобразованию не подвергается [2].

Второй уровень L2 условно подразделяется на 4 подуровня: уровень протокола адаптации служебных данных SDAP (Service Data Adaptation Protocol), уровень протокола конвергенции пакетных данных PDCP (Packet

Data Convergence Protocol), уровень контроля радиосоединения RLC (Radio Link Control), уровень контроля доступа MAC (Medium Access Control) [3]. Протокол SDAP осуществляет отображение IP-пакетов пользовательских данных, производимых функцией ядра сети UPF, на радиоресурсы в формате DRB (от англ. Data Radio Bearer) в соответствии с технологией QoS (от англ. Quality of Service); управляющая информация протоколом SDAP не обрабатывается. Протоколы более низких уровней преобразуют как пользовательскую, так и управляющую информацию одними и теми же алгоритмами. Протокол PDCP отвечает за шифрование, сжатие заголовков IPцелостности данных, дубликатов пакетов, проверку удаление И упорядоченность пришедших IP-пакетов. RLC протокол осуществляет доставку данных на более высокие уровни, выполняя сегментацию данных и определение ошибок с помощью механизма ARQ (Automatic Repeat Request) и сообщается с уровнем PDCP посредством одноименного канала RLC. Протокол МАС осуществляет планирование радиоресурсов (от англ. Scheduling) и определение ошибок с помощью механизма Hybrid ARQ, используя для взаимодействия с подуровнем RLC логические каналы.

На последнем, физическом уровне (PHY), связанном с подуровнем МАС транспортным каналом, осуществляется кодирование (декодирование) канала, отображение (извлечение) цифровых отсчетов в частотно-временную область и модуляция (демодуляция) сигнала.

Далее рассмотрим основные компоненты физического уровня, который в большей степени затронут в работе. Физический уровень является основным во всей системе связи и, по большей части, обеспечивает ее гибкость. На физическом уровне осуществляется обработка сигналов в цифровом виде – ключевой этап для системы цифровой радиосвязи.

1.5 Обзор ключевых компонентов физического уровня 5G NR [9-15]

Основным видом кодирования канала в 5G являются коды с низкой плотностью проверок битов на четность (от англ. LDPC), которые наиболее широко используются для реализации сценария eMBB. Привлекательность

кодов LDPC обусловлена возможностью работы на больших скоростях передачи данных. Адаптация LDPC для систем связи пятого поколения имеет гибкую структуру, совместимую со скоростью кодирования, что позволяет обеспечить работу на разных кодовых скоростях и функционирование механизма HARQ с использованием инкрементного резервирования при доставке пользовательских данных. Для управляющих сигналов физического уровня, оперирующих блоками данных существенно более малой длины и не задействующих механизм HARQ, применяются полярные коды. Для самых коротких из управляющих сигналов стандарты NR предусматривают кодирование методом Рида-Мюллера [16].

Для перевода битового потока в последовательность цифровых отсчетов в 5G NR используются схемы цифровой модуляции. Среди видов цифровой модуляции в 5G NR можно отметить схемы, применяющиеся повсеместно как в нисходящем, так и в восходящем канале: квадратурную фазовую манипуляцию (QPSK), квадратурную амплитудную модуляцию (16QAM, 64QAM и 256QAM). В этом отношении стандарты пятого и четвертого поколений совпадают. В системах пятого поколения в восходящей линии связи поддерживаются схемы двоичной фазовой манипуляции (BPSK, $\pi/2$ -BPSK). Использование последней предпочтительно для сервисов mMTC с целью снижения уровня PAPR (peak to average power ratio), что повышает эффективность устройства при работе на низких скоростях. Гибкая структура системы связи допускает, что в будущих релизах стандартов набор модуляционных схем может быть расширен, в частности, в их число может войти 1024QAM.

Для одновременной радиопередачи нисходящей и восходящей линии в одном кадре, в системе связи предусмотрено разделение каналов по частоте (FDD, Frequency Division Duplex) и по времени (TDD, Time Division Duplex). Улучшением по сравнению с 4G является поддержка динамического TDD, при котором параметры разделения изменяются во времени. В этом случае решения планирования радиоресурсов, принимаемые базовой станцией (gNB)

и пользовательским оборудованием (UE), могут быть оптимизированы для избежания помех между соседними узлами сети, например, путем задания определенной периодичности переключения нисходящей/восходящей линии связи. Динамическое разделение может быть крайне полезно при сценариях работы системы связи с быстрым изменением трафика.

Существование одновременно обоих вариантов TDD и FDD указывает на частотно-временной характер представления ресурсов физического уровня. Действительно, именно такой способ представления информации определен стандартами 5G NR. Пример ресурсной сетки с ячейками по частоте и по времени представлен на рисунке 3. Содержимым каждой ячейки являются комплексные модуляционные символы.



Рисунок 3 – Структура кадра в стандарте 5G NR

ОFDM-символы, откладывающиеся в горизонтальном направлении, являются эталонной единицей во временной области. Длительность одного OFDM-символа обратно пропорциональна расстоянию между поднесущими Δf . Группы по 12 или 14 OFDM-символов образуют слоты (slots). В зависимости от величины параметра μ , который может принимать значения 0, 1, 2, 3 или 4, наборы по 10, 20, 40, 80 или 160 слотов соответственно образуют

подкадры (subframes). Каждые 10 подкадров, в свою очередь, образуют кадры (frames) длительностью 10 мс.

В частотной области информация распределяется по поднесущим частотам.

Таким образом, наименьшей единицей частотно-временного распределения является одна поднесущая, по которой передается информация в пределах одного OFDM-символа, также называемая ресурс-элементом. Каждые 12 соседних ресурс-элементов образуют физический ресурсный блок (PRB).

Последним формирования этапом низкочастотного сигнала, получившего в англоязычной литературе устоявшееся название Waveform, является модуляция OFDM с добавлением циклического префикса. OFDM (от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) – метод цифровой модуляции, при котором передаваемый сигнал распределяется по множеству ортогональных и не перекрывающих друг друга поднесущих частот. Процедура OFDM заключается в применении обратного дискретного преобразования Фурье к ячейкам сетки ресурсов. Результирующий сигнал во временной области состоит из последовательности ОFDM-символов. Добавление к началу каждого OFDM-символа циклического префикса, копии конца этого символа, направлено на противостояние замираниям, вызванным многолучевостью в радиоканале. Стандартами определено 2 возможных значения циклического префикса (СР): нормальный и расширенный. На рисунке 4 представлен пример спектра OFDM-CP-сигнала.



Рисунок 4 – Пример спектра OFDM-сигнала 1.6 Каналы и сигналы физического уровня 5G NR

Все ресурсы физического уровня, как в восходящем, так и в нисходящем канале можно разделить на физические каналы, по которым передается информация с более высоких уровней, и физические сигналы, использующиеся в качестве опорных. К числу опорных сигналов в 5G относятся DM-RS, PT-RS, CSI-RS, SRS, PSS, SSS.

1) Сигналы DM-RS (Demodulation Reference Signal), являющиеся основным видом опорных сигналов в системах пятого поколения и имеющие довольно гибкую структуру, используются для временной синхронизации, оценки канала и последующего выравнивания комплексных отсчетов принятого сигнала в эквалайзере. Аналогичным по назначению в системах четвертого поколения, но менее рациональным и гибким решением является CRS (Cell Reference Signal), передаваемый во всей полосе частот (20 МГц) независимо от действительного расположения физических каналов. Согласно стандартам 5G NR каждый физический канал сопровождается собственным DM-RS, локализованным по частоте лишь в заданной области с целью экономии радиоресурсов. Количество символов DM-RS в слоте радиокадра может варьироваться, что позволяет использовать DM-RS и на низких, и на высоких скоростях передачи данных. Для работы на низких скоростях передачи данных (eMBB, mMTC) в слоте может использоваться всего один символ DM-RS. Для реализации сценария связи со сверхнизкими задержками конструкция DM-RS учитывает требования к раннему декодированию

сигнала. По этой причине символы DM-RS располагаются в начале слота (Front-Loaded DM-RS), а их количество в одном слоте увеличивается для отслеживания быстрых изменений в радиоканале [17].

2) Сигналы PT-RS используются для отслеживания и компенсации фазового шума гетеродинов передатчика и приемника. С учетом тенденции быстрого увеличения фазового шума с ростом частоты механизм коррекции фазовых ошибок, который обеспечивается сигналами PT-RS, тем более востребован в системах пятого поколения. В системах связи 4G аналогичный сигнал отсутствует в связи с использованием более низких частот. Сигналы PT-RS позволяют компенсировать как общую ошибку фазы (CPE, Common Phase Error), при наличии которой все комплексные символы сигнального созвездия приобретают одинаковый фазовый набег; так и дополнительное смещение фазы, оригинальное для каждого символа. В последнем случае фазовые ошибки слабо коррелированы между соседними OFDM-символами. Поэтому символы PT-RS расположены плотно во временной области ресурсной сетки (в каждом втором или каждом четвертом OFDM-символе слота) и разрежено в частотной. Такая конструкция сигнала не обязательна для подавления влияния СРЕ, основного негативного фактора фазовых шумов, но необходима для учета дополнительного фазового сдвига [18].

3) CSI-RS (Channel State Information RS) – особый тип референсных сигналов, разработанный с учетом формирования луча большими массивами антенн (MIMO) и использующийся для оценки состояния нисходящего радиоканала, управления лучом (Beamforming), отслеживания времени/частоты, управления мощностью в восходящей линии связи [19]. Параметры состояния нисходящего канала включают индикатор качества канала (CQI), индикатор ранга (RI), индикатор матрицы предварительного кодирования (PMI) и необходимы для адаптации канала и определения прекодера.

CSI-RS имеет весьма гибкую структуру, позволяющую использовать этот тип сигнала, в том числе, для отслеживания частоты/времени. Для этого

задействуются 4 (из максимально возможных 32) однопортовых сигнала CSI-RS со специально заданным набором параметров; такая конфигурация имеет отдельное название – TRS (Tracking Reference Signal). TRS подобно DM-RS может использоваться для синхронизации по времени, оценки канала и демодуляции.

Понятие антенных портов требует отдельного пояснения. Согласно стандартам 5G NR при передаче по каждому отдельному антенному порту сигнал или проходит через радиоканал с уникальными относительно других портов условиями распространения, или подвергается отличной от остальных портов процедуре формирования луча. В противном случае, когда два OFDMсимвола подвергаются одним и тем же искажениям в радиоканале, а процедуры формирования луча для них совпадают, то обоим символам присваивается одно значение номера порта антенны. Таким образом, каждый антенный порт не обязательно соответствует реальной антенне и является абстракцией, вводящейся для удобного описания.

4) SRS (Sounding Reference Signal) является аналогом сигнала CSI-RS для оценки состояния канала в восходящей линии. Посредством обратной связи данные о состоянии радиоканала, местоположение абонента, необходимое для управления лучом и мобильностью сообщаются базовой станции. На их основе на стороне базовой станции принимается решение на выделение ресурсов для передачи и адаптации канала путем предварительного кодирования. Гибкая структура сигналов CSI-RS и SRS, являющихся очередным нововведением стандарта 5G NR, делает эти опорные сигналы более рациональными по сравнению с использующимся в 4G CRS.

5) Сигналы PSS (Primiary Synchronization Signal) и SSS (Secondary Synchronization Signal) используются для подключения абонента к системе связи, включая поиск соты, и синхронизации во времени в нисходящей линии и являются т.н. «always-on» сигналами. Сигнал PSS имеет 3 кодовых последовательности, SSS – 336. Таким образом, общее число уникальных кодовых последовательностей – идентификатор физической ячейки (Physical

Channel Identity) – равно 1008, что вдвое превышает величину аналогичного параметра в LTE. На отображение в частотно-временную область под PSS и SSS в целях экономии выделяется достаточно малое количество ресурсов: 127 активных поднесущих в частотной области и по OFDM-символу во временной.

Физическими каналами, по которым передается пользовательская или управляющая информация, являются РВСН, РDССН, PDSCH – в нисходящей и PRACH, PUCCH, PUSCH – в восходящей линии связи.

1) PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) – физический канал, предназначенный для передачи транспортных блоков пользовательских данных, приходящих с уровня MAC. В пределах PDSCH может содержаться 1 кодовое слово (поток бит после этапа кодирования канала), передаваемое на 1-4 уровнях (Layers) или 2 кодовых слова, размещаемые на 5-8 уровнях. Последнее реализуется в режиме пространственного мультиплексирования при условии высокого соотношения сигнал/шум. Занимаемая часть частотновременного пространства PDSCH определяется планировщиком, в то время как в 4G PDSCH занимает всю выделенную область частот и весь подкадр длительностью 1 мс. Основными этапами формирования сигнала являются кодирование канала LDPC кодами, цифровая модуляция, отображение цифровых отсчетов частотно-временную область и OFDM-модуляция. Процесс формирования PDSCH подробно описан во 2-ой главе.

2) PDCCH (Physical Downlink Control Channel) – физический канал для передачи управляющей информации DCI (Downlink Control Information). DCI содержит информацию о планировании передачи PDSCH и PUSCH и другие системные сведения уведомительного характера. PDCCH снабжается собственными сигналами DM-RS. Частотно-временные ресурсы, выделяемые под передачу PDCCH, составляют 1, 2 или 3 символа во временной области и задаются набором CORESET (Control Resource Set). В системах четвертого поколения PDCCH занимает всю полосу радиокадра. Для обеспечения гибкости генерации существует 4 формата PDCCH, каждый из которых, в

свою очередь, имеет несколько подформатов для различных типов сообщений. Информация об используемом при передаче формате на приемной стороне определяется значением уникального для каждого абонента идентификатора RNTI, используемого при генерации маскирующей DCI скремблирующей последовательности. Кодирование канала PDCCH осуществляется при помощи полярных кодов, эффективных при обработке блоков малой длины.

3) Канал PBCH (Physical Broadcast Channel) предназначен для передачи блока информации MIB (Master Information Block), необходимой для доступа абонента к сети и синхронизации; и другой служебной информации. MIB, в свою очередь, содержит конфигурацию CORESET – сведения о расположении частотно-временных ресурсов и наборе параметров, необходимых для приема PDCCH.

Сигналы PSS, SSS объединяются с каналом PBCH в блоки синхросигналов (SSB, Synchronization Signal Block), состоящие из 4 OFDMсимволов и 240 поднесущих. Частотно-временная структура блока SS показана на рисунке 5.



Рисунок 5 – Частотно-временная структура блока SS Block (PSS, SSS, PBCH) Блоки SS объединяются в пакеты SS Burst, передаваемые базовой станцией с определенной периодичностью, которая может быть равной 5, 10, 20, 40, 80, 160 мс [20].

4) РUCCH – физический канал восходящей линии, которому передается управляющая информация UCI (Uplink Control Information). UCI содержит «квиттирующий» бит Hybrid ARQ ACK/NACK (Acknowledgement/Negative Acknowledgement), запрос планирования радиоресурсов SR (Schedule Request), информацию о состоянии канала CSI. Для использования в различных условиях связи стандарты 5G NR определяют 5 форматов конфигурации канала PUCCH, рассматривающихся в 3 главе.

5) PUSCH – физический канал передачи пользовательской информации в восходящей линии связи, во многом аналогичный PDSCH. В 1 PUSCH передается 1 кодовое слово в пределах 4 уровней. PUSCH также, как и PDSCH, занимает определенное планировщиком количество OFDM-символов и ресурс-блоков сетки кадра. В отличие от PDSCH, PUSCH помимо пользовательских данных может содержать и контрольную информацию UCI.

6) PRACH (Physical Random Access Channel) – физический канал произвольного доступа пользователей к сети для установления первичного абонента подключения подключения И корректировки В условиях мобильности абонента. Для генерации преамбулы произвольного доступа используется последовательность Задова-Чу. В целях обеспечения гибкости формирования PRACH стандартами 5G NR предусмотрены использование последовательностей различной длины (839, 139, 571 или 1151 отсчетов), поддержка собственного разнесения поднесущих, равного $\Delta f =$ 1.25, 5, 15, 30, 60 или 120 кГц, ряд различных форматов для передачи. Выбор длины последовательности, ее формата и расстояния между поднесущими зависит от расстояния между UE и базовой станцией и условий связи. Периодичность передачи PRACH, подобно SS Burst, настраиваема и составляет от 10 до 160 мс.

Все физические каналы, за исключением PUCCH нулевого формата и PRACH, сопровождаются опорными DM-RS сигналами, позволяющими за счет когерентной демодуляции на приемной стороне выполнять оценку вносимых искажений с последующей коррекцией принятых отсчетов. В отличие от CRS в 4G, занимающих всю полосу частот ресурсной сетки, DM-RS локализуются строго в заданной области частот, в которой передается сопровождаемый физический канал.

Каналы передачи данных PUSCH и PDSCH помимо DM-RS дополнительно снабжаются сигналами отслеживания и коррекции фазы PT-RS.

1.7 Начальный доступ абонента к сети

Начальный доступ абонента к системе связи и корректировка ранее установленного подключения в условиях мобильности абонента, осуществляются посредством выполнения процедур поиска соты и подключения к обнаруженной соте, что демонстрируется на рисунке 6.



Рисунок 6 – Начальный доступ абонента к сети

На первом этапе базовая станция независимо от пользователя в режиме «always-on» с определенной периодичностью передает наборы SS Burst. Передача каждого набора блоков SS Block из пакета SS Burst происходит в режиме пространственного мультиплексирования: сигнал, передающий каждый блок, излучается антенной в заданном направлении в виде узкого луча, что иллюстрируется на рисунке 7.



Рисунок 7 – Передача SS Block (PSS, SSS, PBCH) в режиме пространственного мультиплексирования [21]

В пользовательском оборудовании производится измерение мощности каждого обнаруженного блока SS, определяется пиковое значение из всего набора принятых блоков; извлекается соответствующий набор CORESET, несущий информацию о местоположении частотно-временных ресурсов, с привлечением которых будет производиться передача PDCCH. Таким способом достигается синхронизация с определенной сотой в нисходящей линии связи.

На следующем этапе после поиска соты пользователь UE предпринимает попытки получить доступ к сети, о чем уведомляет базовую станцию посредством передачи канала PRACH в заданном направлении, определенном при приеме SS Burst.

Безошибочный прием PRACH на стороне базовой станции позволяет предоставить абоненту доступ к сети и синхронизоваться в восходящей линии связи. Использование в основе PRACH последовательности позволяет избежать различных конфликтных сценариев, например, в случае попытки одновременного подключения к сети двух близко расположенных устройств, детектировавших один и тот же SS Block.

Как только устройство передало преамбулу произвольного доступа, оно ожидает ответа-подтверждения произвольного доступа от базовой станции, то есть ответа от сети о том, что преамбула получена правильно. В дальнейший обмен информацией вовлекаются каналы PUSCH/PDSCH и PUCCH/PDCCH.

1.8 Комплекс алгоритмов и программ, реализующих генерацию и формирование сигналов физического уровня стандарта 5G NR

В соответствии со стандартами 3GPP 5G NR, основные положения которых представлены в данной главе, коллективом сотрудников кафедры радиофизики НИ ТГУ при непосредственном участии автора разработано тестовое программное обеспечение, реализующее весь комплекс алгоритмов формирования и обработки сигналов в системах связи пятого поколения [2-6]. В состав комплекса входят пять программ для ЭВМ «Формирование мобильной синхросигналов связи стандарта 5G NR», «Программа формирования сигналов 5G Downlink», «Программа формирования сигналов 5G Uplink», «Программа анализа сигналов 5G Downlink», «Программа анализа сигналов 5G Uplink».

Данный комплекс алгоритмов и программ является частью программноаппаратного комплекса, разработанного совместно сотрудниками кафедры радиофизики НИ ТГУ и сотрудниками «АО «НПФ Микран». При этом проводившиеся на момент разработки патентные исследования (Приложение А) показали, что аналогичный программно-аппаратный комплекс на отечественном поле отсутствует; существуют разработки только отдельных компонентов.

Программы, реализующие формирование Uplink и Downlink сигналов, а также программа формирования синхросигналов предназначены для генерации полного радиокадра сигнала стандарта 5G NR, содержащего физические каналы и сигналы PRACH, PUCCH, PUSCH, SRS, PDSCH, PDCCH, CSI-RS, SS Burst и связанные с ними опорные сигналы DM-RS, PT-RS по набору параметров, задаваемых посредством графического интерфейса. В программах реализовано отображение распределения частотно-временных ресурсов в удобной для восприятия форме, отображение осциллограмм вещественной и мнимой частей сгенерированного сигнала, запись отсчетов сгенерированного сигнала в файл для дальнейшего их использования программно-аппаратным комплексом.

Программы анализа Downlink и Uplink сигналов предназначены для детектирования, демодуляции и анализа сигналов стандарта 5G NR. Программы обеспечивают выполнение следующих функций: считывание из файла комплексного сигнала; задание параметров, необходимых для детектирования каналов и сигналов PRACH, PUCCH, PUSCH, SRS, PDSCH, PDCCH, CSI-RS и связанных с ними опорных сигналов DM-RS, PT-RS посредством графического интерфейса; детектирование и демодуляция, не менее одного слота кадра; оценка состояния отдельного канала: мощность, опорные и измеренные символы IQ, величина вектора ошибки, значение амплитуды и рассогласования фазы и другие параметры. Результаты работы программы выводятся оператору в виде графиков и таблиц, декодированные данные записываются в файлы.

При разработке программ проводилась всесторонняя отладка и подтверждающие правильность их работы верификация, В условиях численных экспериментов, когда исследовалась возможность демодуляции сигнала после пропускания его через численную модель радиоканала и Однако наложения аддитивных шумов. практической отработке с использованием аппаратной стороны созданные алгоритмы и программы не В отечественной И зарубежной подвергались. литературе работы, посвященные практическим экспериментам по приемопередаче сигналов стандарта 5G NR, полностью отсутствуют. Для системы беспроводной радиосвязи ключевое место имеет, как минимум, сама возможность приемопередачи сигналов пятого поколения при помощи не самых дорогих радиоустройств, которая может быть поставлена под сомнение ввиду неочевидности характера производимой этими устройствами фильтрации.

Следующим после разработки программ этапом является продолжение численных и постановка практических экспериментов. Последнее позволяет в полной мере задействовать все механизмы помехоустойчивости, предусмотренные на приемной стороне. Поэтому результаты, приводимые в

данной работе, представляют значительный научный интерес и имеют безусловную практическую значимость.

1.9 Выводы по главе 1

В первой главе проведен литературный обзор предыдущих поколений технологий мобильной радиосвязи, подтверждающий актуальность систем 5G NR. Рассмотрены основные методы и алгоритмы обработки цифровых сигналов на физическом уровне систем связи 5G NR, в соответствии с которыми сотрудниками кафедры радиофизики НИ ТГУ при активном участии автора разработан комплекс алгоритмов и программ, реализующих генерацию и демодуляцию сигналов стандарта 5G NR ([2-6], приложение б).
2 Исследование помехоустойчивости 5G NR при одновременной работе с системой связи с шумоподобными сигналами

Современный мир, плотно насыщенный устройствами, обменивающимися информацией во множестве частотных диапазонов, диктует довольно строгие требования на совместимость систем пятого поколения с иными системами связи, которых существует огромное множество. Данная глава посвящена исследованию работы 5G NR совместно с источником внешнего шумоподобного сигнала – в условиях, наиболее приближенных к реальной работе системы связи.

2.1 Система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

В качестве источника внешнего шумоподобного сигнала привлекается система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией, в основе которой лежит использование шумоподобных широкополосных сигналов [22-24]. На рисунке 8 представлена функциональная схема передающего устройства данной системы, состоящая из двух частей. Верхняя часть схемы генерирует информационную последовательность комплексных символов. В нижней линией, пунктирной формируется части, выделенной сигнальное (управляющее) сообщение. Схема базируется на использовании детерминированных шумоподобных сигналов, формируемых в генераторах псевдослучайных последовательностей $\xi(t, t_n)$, $\eta(t, t_n)$, $\zeta(t, t_n)$ и $\varsigma(t, t_n)$, являются некоррелированными между собой отсчетами белого которые гауссового шума с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

При формировании информационного сообщения в блоке 1 каждая пара бит информационного сообщения отображается в комплексный модуляционный символ $I(t, t_s) + iQ(t, t_s)$ методами квадратурной фазовой манипуляции. Вещественная часть комплексного сигнала модулирует отсчеты генератора псевдослучайной последовательности $\xi(t, t_n)$ в блоке 2, мнимая – отсчеты генератора псевдослучайной последовательности $\eta(t, t_n)$ в блоке 3. Время изменения значений на выходе генераторов псевдослучайных

последовательностей t_n много меньше времени t_s , за которое изменяются значения $I(t, t_s)$ и $Q(t, t_s)$.



псевдослучайной цифровой модуляцией

Блоки, пунктирной линией, выделенные используются для формирования сигнального (управляющего) сообщения. Последовательность бит сигнального сообщения $S(t, t_s)$, известная на приемной стороне, переводится в биполярную форму и модулирует отсчеты псевдослучайной последовательности $\zeta(t, t_n)$, генерируемые в блоке 4. Результирующий сигнал подается на вход переключателя К1. На вход переключателя К2 поступают задержанные на N интервалов t_s немодулированные значения $\zeta(t, t_n)$. Величина задержки N является параметром системы и заранее известна в приемном и передающем устройствах. Если обозначить за N_ssm количество бит в сигнальном сообщении, то произведение $N_s^{sm} \cdot t_s$ равно длительности передачи одного кадра управляющего сигнала.

Передача сигнального сообщения $S(t, t_s)$ происходит в течение времени

$$t_{fs} < t_{sp} < N_s^{sm} \cdot t_s, \tag{1}$$

где t_{fs} – начальное время.

В этот промежуток времени на выходе переключателя К1 формируется сигнал $S(t,t_s)\zeta(t,t_n)$, а на выходе переключателя К2 формируется сигнал $\zeta(t - Nt_n, t_n)$. Сразу по окончании передачи одного кадра, через время $N_s^{sm} \cdot t_s - t_{fs}$ блок 6 перезапускает генератор 5 и коммутирует отсчеты псевдослучайной последовательности $\zeta(t, t_n)$, в течение времени, равное одному символьному интервалу t_s , на вход сумматоров (блоки 8 и 9 на рисунке 8). Далее путем гетеродинирования полученный сигнал переносится в высокочастотную область с центральной частотой ω_0 :

$$X(t, t_n, t_s) = (I(t, t_s)\xi(t, t_n) + S(t, t_s)\zeta(t, t_n))\cos(\omega_0 t) +$$
(2)
+ $(Q(t, t_s)\eta(t, t_n) + S(t, t_s)\zeta(t - Nt_n, t_n))\sin(\omega_0 t),$
при $0 < t \le SLen \cdot t_s,$
$$X(t, t_n, t_s) = (I(t, t_s)\xi(t, t_n) + \varsigma(t, t_n))\cos(\omega_0 t) +$$
(3)
+ $(Q(t, t_s)\eta(t, t_n) + \varsigma(t, t_n))\sin(\omega_0 t),$
при $SLen \cdot t_s < t \le (SLen + 1) \cdot t_s$

Управляющий блок 6 является источником бит сигнального сообщения $S(t, t_s)$ и контролирует состояния переключателей К1 и К2. Стоит обратить внимание, что процедура генерации сигнального сообщения является цикличной, период повторения равен $(N_s^{sm} + 1) \cdot t_s$ и состоит из двух этапов. На первом этапе происходит передача кодовой последовательности – N_s^{sm} заранее известных бит. Этот этап необходим для определения момента включения генераторов шума и используется для нахождения времени начала

генерации сигнального сообщения t_{fs} . На втором этапе в синфазной и квадратурной составляющих управляющего сигнала передается последовательность случайных значений $\varsigma(t,t_n)$ течение В одного символьного интервала t_s. Этот этап необходим для определения фазового сдвига гетеродина в приемном устройстве. Каждый цикл генерации управляющего сигнала заканчивается перезапуском генераторов псевдослучайных последовательностей, расположенных в блоках 2 и 3. Результатом работы передающего устройства является вещественный высокочастотный сигнал $X(t, t_n, t_s)$.

На рисунке 9 представлена функциональная схема приемной стороны. Высокочастотный сигнал с несущей частотой ω_0 умножением на синфазную и квадратурную составляющие несущего колебания и фильтрацией фильтрами нижних частот (блоки 2 и 3 на схеме) переносится на нулевую частоту. Выражения 4 и 5 описывают сигналы $Y_I(t, t_n, t_s)$ и $Y_Q(t, t_n, t_s)$ на выходах фильтров низких частот (блоки 14 и 15 на рисунке 9):

$$Y_Q(t, t_n, t_s) = (I(t, t_s)\xi(t, t_n) + \varsigma(t, t_n))\sin(\phi) + (Q(t, t_s)\eta(t, t_n) + \varsigma(t, t_n))\cos(\phi),$$
при SLen · $t_s < t < (SLen + 1) \cdot t_s$.

Значение угла ϕ в этих выражениях определяется фазовой расстройкой гетеродинов в приемном и передающем устройствах.



Рисунок 9 – Функциональная схема приемной системы

В блоке 3 вычисляется взаимная корреляция значений $Y_Q(t,t_n,t_s)$ с задержанными на N временных интервалов t_n значениями $Y_I(t,t_n,t_s)$. В блоке 4 вычисляется взаимная корреляция значений $Y_I(t,t_n,t_s)$ с задержанными на N временных интервалов t_n значениями $Y_Q(t,t_n,t_s)$. В силу взаимной некоррелированности псевдослучайных отсчетов $\xi(t,t_n)$, $\eta(t,t_n)$, и $\zeta(t,t_n)$ значения сигналов на выходах корреляторов 3 и 4 определяются, соответственно, выражениями 6 и 7:

$$\langle Y_{I}(t - Nt_{n}, t_{n}, t_{s})Y_{Q}(t, t_{n}, t_{s})\rangle = \sigma_{\zeta}^{2}(t - Nt_{n}, t_{n})S(t - Nt_{n}, t_{s})\cos^{2}(\phi), \quad (6)$$

$$\langle Y_{I}(t,t_{n},t_{s})Y_{Q}(t-Nt_{n},t_{n},t_{s})\rangle = -\sigma_{\zeta}^{2}(t-Nt_{n},t_{n})S(t-Nt_{n},t_{s})\sin^{2}(\phi).$$
(7)

сигнала $\langle Y_I(t - Nt_n, t_n, t_s)Y_O(t, t_n, t_s) \rangle$ – Знак разностного $\langle Y_{I}(t, t_{n}, t_{s})Y_{Q}(t - Nt_{n}, t_{n}, t_{s})\rangle$, полностью определяется значениями битов сообщения $S(t,t_s)$. Прием сообщения сигнального сигнального (управляющий блок 6 на рисунке 9) позволяет решить сразу две проблемы, традиционно встающие перед разработчиками систем цифровой связи с псевдослучайной цифровой модуляцией. Во-первых, определение момента времени приема последнего бита сигнального сообщения обеспечивает синхронный перезапуск генераторов псевдослучайных последовательностей в передающем и приемном пунктах связи. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность когерентной обработки сигнала при детектировании информационного сообщения. Во-вторых, в этот же момент времени модуляционные QPSK-символы информационного сообщения сменяют друг друга. Таким образом, прием сигнального сообщения обеспечивает решение проблемы временной синхронизации приемного и передающего пунктов связи.

После детектирования последнего бита сигнального сообщения управляющий блок 6 генерирует сигнал перезапуска генератора псевдослучайной последовательности $\varsigma(t, t_n)$ (блок 5 на рисунке 9), изменяет состояние ключей К1 и К2, коммутируя последовательность псевдослучайных отсчетов $\varsigma(t, t_n)$ на входы корреляторов 3 и 4. В результате на выходах корреляторов в течение одного символьного интервала t_s формируются сигналы, определяемые выражениями:

$$\langle Y_{I}(t,t_{n},t_{s})\varsigma(t,t_{n})\rangle = \frac{1}{2}\sigma_{\varsigma}^{2}(\cos(\phi) - \sin(\phi)), \tag{8}$$

при SLen · $t_{s} < t \le (SLen + 1) \cdot t_{s},$

$$\langle Y_{Q}(t,t_{n},t_{s})\varsigma(t,t_{n})\rangle = \frac{1}{2}\sigma_{\varsigma}^{2}(\cos(\phi) + \sin(\phi)), \tag{9}$$

при SLen
$$\cdot t_s < t \leq (SLen + 1) \cdot t_s$$
,

Это позволяет рассчитать фазовый множитель, обеспечивающий компенсацию фазовой расстройки гетеродинов приемного и передающего пунктов связи:

$$\sigma_{\varsigma}^{2}e^{-i\phi} = \langle Y_{I}(t,t_{n},t_{s})\varsigma(t,t_{n})\rangle + \langle Y_{Q}(t,t_{n},t_{s})\varsigma(t,t_{n})\rangle -$$
(10)
$$-i(\langle Y_{Q}(t,t_{n},t_{s})\varsigma(t,t_{n})\rangle - \langle Y_{I}(t,t_{n},t_{s})\varsigma(t,t_{n})\rangle).$$

Управляющий блок 6 через один символьный интервал времени t_s после детектирования сигнального сообщения перезапускает генератор 7 комплексной псевдослучайной последовательности $\xi(t, t_n) + i\eta(t, t_n)$, и выставляет значение компенсирующего множителя $\sigma_s^2 e^{-i\phi}$ на входе умножителя в приемном тракте информационного сообщения. В результате на первом входе коррелятора 9 формируется сигнал, определяемый выражением:

$$\left(Y_I(t,t_n,t_s) + Y_Q(t,t_n,t_s) \right) \sigma_{\varsigma}^2 e^{-i\phi} =$$

$$= \sigma_{\varsigma}^2 \left(I(t_s)\xi(t,t_n) + iQ(t_s)\eta(t,t_n) \right),$$

$$(11)$$

Ha второй ВХОД ЭТОГО коррелятора подаются комплексные $\xi(t,t_n) + i\eta(t,t_n).$ псевдослучайные отсчеты В силу взаимной некоррелированности значений $\xi(t, t_n)$ и $\eta(t, t_n)$ знаки вещественной и мнимой частей сигнала на выходе коррелятора 9 полностью определяются значениями бит информационного сообщения. Блок 10 приемной системы отображение QPSK-созвездия выполняет точек В значения бит информационного сообщения.

Благодаря особенностям система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией функционирует при низком уровне отношения сигнал/шум и имеет неограниченные возможности по разделению абонентов, в связи с чем

анализ ее совместной работы с 5G NR представляет тем больший значительный научный интерес.

2.2 Формирование канала PDSCH

Можно выделить 3 этапа формирования канала PDSCH, используемого в экспериментах: кодирование канала с малой плотностью проверок битов на четность (LDPC), отображение канальных символов в массивы данных (Mapping), цифровая модуляция сигнала перед меппингом и после. Канальное кодирование, в свою очередь, включает в себя следующие процедуры: добавление CRC, выбор базового графа, разделение данных на блоки (сегментация), LDPC кодирование, согласование скоростей, объединение кодовых блоков, скрэмблирование.

1) На первом этапе кодирования канала производится добавление к транспортному блоку, данным пользователя, пришедшим уровня контроля доступа МАС, битов CRC (Cyclic Redundancy Check). CRC – контрольная сумма, полиномиально генерируемая с коэффициентами, определяемыми содержимым битов данных и необходимая для обнаружения ошибок на приемной стороне. Для транспортного блока длиной более 3824 бит используется CRC длиной 24 бита, в противном случае длина CRC выбирается равной 16 бит.

2) В соответствии с размером передаваемого транспортного блока и заданной скоростью кодирования осуществляется выбор одного из двух вариантов базового графа BGN (проверочной матрицы, в дальнейшем использующейся LDPC кодером): 1 или 2. Оба варианта матриц состоят, в основном, из нулей и малого числа единиц, что делает процедуру декодирования на приемной стороне наиболее простой.

3) В случае передачи больших объемов данных, превосходящих заданные спецификациями 5G NR размеры (8424 бита для базового графа 1 и 3840 бит для базового графа 2), осуществляется разделение (Segmentation) транспортного потока на блоки кода одинакового размера и добавление CRC

к каждому кодовому блоку. В случае передачи одного кодового блока биты CRC дополнительно не добавляются.

4) Основным этапом кодирования канала является LDPC кодирование (линейное блочное кодирование с низкой плотностью проверок на четность) сегментированных блоков данных, в процессе которого на основании выбранного ранее графа генерируются биты четности, впоследствии добавляемые к исходным данным.

5) На этапе rate matching скорости каждого блока согласовываются (путем извлечения заданного количества закодированных битов) С назначенными передачи частотно-временными ресурсами. Для ДЛЯ согласования скоростей на первом этапе в целях сбора битов используется внутренний буфер (область временного хранения битов LDPC кодера с фиксированной длиной). На втором этапе согласования в зависимости от передачи PDSCH ресурсов буфера доступных для ИЗ внутреннего выбор битов, 3 осуществляется включающий основных операции: прокалывание, удаление и перемежение битов.

В конечном счете, согласование скоростей позволяет повысить устойчивость к пакетным ошибкам и отбросить биты, как правило, оказывающиеся битами четности, не попадающие в область выделенных ресурсов. Кроме того, rate matching позволяет создать несколько версий избыточности RV (Redundancy Versions), необходимых для обеспечения функционирования механизма HARQ на физическом уровне.

6) Объединение кодовых блоков с согласованными скоростями в единый поток данных осуществляется, как правило, в том же порядке, в котором выполнялась их сегментация.

7) На заключительном этапе кодирования выполняется скремблирование битов, т.е. перемешивание битов случайным образом. Для генерации скремблирующей последовательности, используются идентификатор соты и идентификатор скремблирования, уникальный для каждого абонента. В результате обеспечивается конфиденциальность

передаваемых данных, гарантируется равное распределение мощности по всем ресурс-элементам за счет их общей нейтральности, уменьшаются межсотовые помехи, повышается эффективность подавления помех на приемной стороне.

Последовательность канальных бит с выхода LDPC кодера, называемая кодовым словом, поступает на вход модуляторов, где переводится в цифровые отсчеты в соответствии с одной из схем модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM.

Комплексные последовательности модуляционных символов в несколько этапов, описываемых ниже, отображаются в массивы данных (mapping) и, тем самым, формируют сетку ресурсов.

1) Первым этапом операции mapping является распределение модуляционных символов между несколькими слоями передачи (layers). Число слоев варьируется в зависимости от количества кодовых слов: для 1 кодового слова число layers выбирается равным 1, 2, 3 или 4; в то время как для 2 кодовых слов символы распределяются по 5, 6, 7 или 8 слоям. Данная операция направлена на улучшение спектральной эффективности, надежности передачи и пропускной способности.

2) Распределенные по слоям символы переносятся на антенные порты (antenna port mapping). Как уже отмечалось, каждый антенный порт не обязательно соответствует реальной антенне и является удобной абстракцией. Для всех физических каналов и сигналов SRS и CSI-RS выделяются определенные диапазоны антенных портов. В нисходящей линии под передачу канала PDSCH выделяются антенные порты, начинающиеся с номеров 1000, для PDCCH – с 2000, PBCH – с 3000 и сигнала CSI-RS – с 4000. Для передачи в восходящей линии для PUSCH, SRS, PUCCH, PRACH используются антенные порты, начинающиеся с номеров 0, 1000, 2000, 4000 соответственно.

Надо заметить, что последовательности опорных символов DM-RS и PT-RS, генерируемые в соответствии с выражением (12), подвергаются в точности аналогичной процедуре распределения по антенным портам. Как следствие,

влияние предварительной антенной обработки автоматически учитывается на приемной стороне при оценке канала.

$$r_l(m) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\left(1 - 2c(2m) \right) + j(1 - 2c(2m+1)) \right), \tag{12}$$

с(*m*) – псевдослучайная последовательность, генерируемая на основе специальной инициализирующей последовательности.

3) На следующем этапе последовательности комплексных символов каждого слоя, соотнесенные с антенными портами, преобразуются в т.н. виртуальные ресурсные блоки (mapping virtual to resource blocks). Отображение осуществляется с В соответствии ИХ индексами, присваивающимися каждому символу в последовательности. Сетка ресурсов заполняется комплексными значениями по мере увеличения их индексов, начиная от наименьшей и заканчивая наибольшей частотой; при достижении верхней частоты операция повторяется для следующего символа OFDM. Естественно, отображение символов PDSCH может происходить только при пределах соответствующего ресурс условии, когда в элемента не запланировано передачи иного канала или сигнала, В том числе, сопровождающих DM-RS и PT-RS.

4) На заключительном этапе формирования сетки ресурсов ячейки VRB преобразуются в физические ресурс блоки (PRB). Стандартами определено 2 разновидности данной процедуры: без перемешивания и с перемешиванием блоков. В первом случае блоки VRB напрямую отображаются на PRB без изменений. Отсутствие перемешивания делает процедуру меппинга в целом наиболее простой. При отображении с перемешиванием (Interleaving) виртуальные ресурсные блоки распределяются по блокам физических ресурсов непоследовательным и рассредоточенным образом. В результате демонстрируется лучшая устойчивость к частотно-избирательным замираниям и помехам по сравнению с отображением без перемешивания, однако возрастает сложность всей процедуры меппинга.

OFDM модуляция, преобразующая отсчеты сетки ресурсов в последовательность комплексных отсчетов во времени, и добавление циклического префикса завершают процесс генерации последовательности PDSCH.

2.3 Процедура приема PDSCH

Надо заметить, что при обычном функционировании системы связи информация проходит через весь стек протоколов 5G NR: RRC, SDAP, PDCP, RLC, MAC, PHY. Процесс обмена данными между абонентом и базовой станцией, в частности, предполагает выполнение всех процедур по подключению абонента к сети и невозможен без использования базовой станции. Постановка задачи, направленная на работу с конкретным физическим сигналом, позволяет ограничиться пределами физического уровня и задать необходимую конфигурацию на приемной стороне. К числу таких RRC параметров, определяющих конфигурацию PDSCH, относятся системные данные о активной в данный момент BWP, типе модуляции, мощности, версии избыточности последовательности RV меппинге, (redundancy version) sequence, которая используется в случае повторной передачи неправильно декодированного на предыдущей итерации пакета.

Для определения границ активной в данный момент BWP привлекаются параметры RRC: число зарезервированных ресурс блоков и номер стартового ресурс блока. Дальнейшие операции проводятся уже не над всей ресурсной сеткой, а лишь внутри BWP.

Для DM-RS конфигурационные параметры RRC включают тип и длину DM-RS в OFDM символах, сведения о дополнительных символах, номера антенных портов, тип меппинга, мощность, инициализацию и номер скремблирующей последовательности.

Конфигурационные параметры RRC сигналов PT-RS содержат информацию о месте ресурсных элементов PT-RS на частотно-временной сетке, мощности сигнала, выделенных антенных портах, входящих в число портов DM-RS.

Таким образом, вся информация, предоставляемая RRC протоколом, задается на передающей и приемной сторонах аналогично и соответствует тестовым наборам параметров RRC, указанных в стандартах 5G NR.

На приемной стороне вся последовательность процедур по генерации сигнала выполняется в обратном порядке; помимо этого выполняются синхронизация, оценка замираний, вызванных прохождением сигнала через радиоканал (Channel Estimate) на основе принятых отсчетов DMRS, и эквилизация данных пользователя. Каждый этап приема сигнала описывается ниже.

1) В соответствии с заданными параметрами RRC в приемнике полностью аналогичным их генерации в передатчике образом формируются последовательности DM-RS и PT-RS и индексы размещения этих элементов на сетке ресурсов, а также индексы размещения PDSCH.

2) На следующем этапе обеспечивается временная синхронизация с целью поиска начала отсчетов PDSCH в принятом сигнале методом согласованной фильтрации. Для этого производится свертка принятого сигнала PDSCH, содержащего DM-RS, с эталонным сигналом DM-RS, сформированным на приемной стороне на первом шаге. Максимальное значение на выходе коррелятора, при условии, что оно превышает заранее заданный пороговый коэффициент, индицирует начало слота, содержащего PDSCH. На рисунке 10 представлен пример временной зависимости амплитуды сигнала на выходе согласованного фильтра при отношении сигнал/шум, равном 10 дБ, и начальном смещении t = 0.



Рисунок 10 – Пример временной зависимости амплитуды сигнала на выходе согласованного фильтра

Из рисунка 10 видно, что наибольший уровень сигнала на выходе согласованного фильтра, по которому определяется начало слота во времени, совпадает с изначально заданным смещением t = 0.

3) Следующим этапом анализа сигнала на приемной стороне является процедура OFDM-демодуляции, включающая удаление защитного циклического префикса и перевод путем прямого преобразования Фурье комплексных отсчетов сигнала в элементы ресурсной сетки.

4) На следующем этапе выполняется оценка канала (Channel Estimate), описание которой требует предварительных пояснений. При прохождении через радиоканал сигнал претерпевает ряд искажений в результате наложения шумов, межсимвольной интерференции (следствие аддитивных многолучевого распространения), смещения фазы из-за расстройки гетеродинов приемного и передающего устройств, доплеровского сдвига частоты. Поэтому для каждого слоя и каждой передающей реальной антенны результат прохождения сигнала через радиоканал записывается в виде (13):

$$Y = HX + N, \tag{13}$$

где Х и У – массивы переданных и принятых отсчетов,

Н – матрица состояния радиоканала,

N – матрица шума.

Отсюда матрица состояния канала при отсутствующем шуме N = 0 может быть найдена как

$$H = Y \cdot X^{-1}. \tag{14}$$

С другой стороны, из элементов X известными являются только символы DM-RS, поэтому оценка канала, сводящаяся к нахождению *H*, разделена на два этапа.

Во-первых, выполняется оценка с точки зрения известных опорных сигналов DM-RS. В выражении (14) содержание матрицы X составляют рассчитанные на основании параметров RRC отсчеты DM-RS. Содержимое столбца Y соответствует местам локализации символов DM-RS в принятой сетке ресурсов. Решение (14) отыскивается методом наименьших квадратов (LS), минимизирующем разницу между принятыми и переданными DM-RS. Результатом данного шага является оценка для областей сетки ресурсов, в которых локализуются DM-RS.

Во-вторых, оцененные значения *H* для DM-RS интерполируются в частотном и временном направлениях, что дает сведения об оценке канала в виртуальных контрольных точках. Виртуальные точки размещаются в каждом ресурсном элементе в пределах всей области частотно-временной сетки, предназначенной для передачи PDSCH. Поскольку сигналы DM-RS также, как и PDSCH, подвергались предварительному кодированию, то данная оценка канала автоматически учитывает операцию переноса значений со слоев на антенные порты.

При проведении оценки канала попутно вычисляется дисперсия шума, используемая в дальнейших экспериментах для определения отношения сигнал/шум:

$$N = Var(H - \hat{H}) \cdot S, \tag{15}$$

где \hat{H} – массив усредненных канальных коэффициентов; операция *Var* эквивалентна $Var(A, \mu) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} |A_i - \mu|^2, \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} A_i;$ *S* – масштабный коэффициент, определяющийся длиной циклического префикса и параметрами RRC сигнала DM-RS.

На рисунке 11 (а) изображен пример практической оценки радиоканала TDL-A100-50, полученной с использованием описанного алгоритма, и фактического состояния канала (б), основанного на его импульсной характеристике. Численные модели канала рассматриваются в следующем параграфе.





Амплитуды, изображенные на рисунках градациями цветов, для канальных и фактических коэффициентов довольно близки.

5) Из ресурсной сетки извлекаются комплексные отсчеты, образуя, в соответствии с ранее рассчитанными индексами PDSCH, последовательности комплексных модуляционных символов (demapping). На рисунке 12 демонстрируется пример демодулированного созвездия. Прошедшие через радиоканал TDL-A100-50 символы сигнального созвездия под влиянием многолучевости претерпевают общий поворот фазы на некоторый угол.



Рисунок 12 – Демодулированное сигнальное созвездие

Аналогичным образом из полученной на предыдущем этапе сетки оценки канала извлекается последовательность оценочных комплексных символов.

6) В эквалайзере (MMSE equalizer) производится выравнивание принятых модуляционных символов относительно символов оценки канала путем поиска минимальной среднеквадратичной ошибки. Кроме того, алгоритмы эквалайзера могут быть использованы для получения информации о состоянии канала CSI.

Процесс выравнивания производится путем поиска минимальной среднеквадратичной ошибки и в результате всех упрощений сводится к выражению

$$C[k] = \frac{H^*[k]}{|H[k]|^2 + 1/\eta}$$
(16)

где η – отношение сигнал/шум, H[k] – передаточная функция, k – номер поднесущей.

На рисунке 13 изображен пример сигнального созвездия на выходе эквалайзера. Общий поворот фазы всех точек созвездия после коррекции в эквалайзере устранен, оставшийся разброс точек связан с неустранимым влиянием аддитивного белого гауссового шума.



Рисунок 13 – Демодулированное сигнальное созвездие после эквалайзера

7) Символы эквалайзера извлекаются из слоев (от 1 до 8), на которых они размещены (layer demapping). Обратное отображение символов происходит в той же последовательности, в которой они размещались при формировании.

8) Перевод комплексных отсчетов (демодуляция) в т.н. мягкие биты максимального правдоподобия, предназначенные для дальнейшего использования LDPC декодером, осуществляется посредством простого перевода систем счисления в соответствии с определенными в стандартах для каждого вида модуляции коэффициентами нормализации мощности (Таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты нормализации мощности для различных типов модуляции

Вид созвездия	Коэффициенты	Количество бит на
	нормализации мощности	символ
BPSK, pi/2-BPSK (не	1	1
используется в Downlink)	$\overline{\sqrt{2}}$	
QPSK	1	2
	$\overline{\sqrt{2}}$	
16QAM	1	4
	$\overline{\sqrt{10}}$	
64QAM	1	6
	$\overline{\sqrt{42}}$	
256QAM	1	8
	$\overline{\sqrt{170}}$	

9) Мягкие биты на выходе демодулятора поступают на вход LDPCдекодера, где в обратном порядке выполняются процедуры по формированию сигнала: дескремблирование, деконкатенация кодовых блоков, согласование скорости, LDPC-декодирование, удаление CRC каждого кодового блока, десегментация (объединение кодовых блоков в единый транспортный блок), удаление битов CRC, прикрепленных ко всему транспортному блоку.

Дескремблирование и деконкатенация мягких битов производятся аналогично скремблированию и конкатенация битов на передающей стороне.

10) Согласование скорости (derate matching) используется для создания матрицы, представляющей кодовые блоки, закодированные с помощью LDPC. Эта функция включает в себя обратные этапы конкатенации кодовых блоков, перемежения битов и выбора битов для данных, закодированных с помощью LDPC.

11) Впоследствии применяется декодер LDPC. Декодер использует алгоритм передачи сообщения сумма-произведение и ожидает, что биты данных будут закодированы LDPC. Результатом декодирования LDPC является матрица выходных битов на основе матрицы мягких битов, номера BGN (1 или 2) и максимального числа итераций базового графа декодирования. На каждой итерации производится сверка контрольной суммы CRC, возвращающая флаг ошибки: логический 0 или 1. В случае ошибочного декодирования данных задействуется механизм HARQ физического уровня, инициирующий повторную передачу PDSCH с другой версией избыточности RV, задаваемой на этапе rate matching на передающей стороне. При количества итераций NR превышении допустимого стандарты 5G предусматривают возврат до более высоких уровней с возможным пересмотром запланированных для передачи ресурсов.

12) Удаление CRC, относящегося к каждому кодовому блоку, десегментация (объединение кодовых блоков в единый транспортный блок), удаление битов CRC, прикрепленных ко всему транспортному блоку завершают процесс декодирования сигнала и его анализа в целом.

2.4 Эксперименты по приемопередаче сигнала 5G NR PDSCH

Для исследования помехоустойчивости описанных выше и реализованных алгоритмов проводятся численные и практические эксперименты, в которых осуществляется приемопередача сигнала PDSCH 5G NR при мешающем воздействии источника внешних аддитивных шумов при различных условиях.

Для передачи формируется сигнал PDSCH с параметрами, указанными в таблицах 2 и 3.

Параметр PDSCH	Значение	Комментарий
NRB	24	Количество ресурс блоков ВWP
SubcarrierSpacing	15 КГц	Разнесение поднесущих
CyclicPrefix	normal	Тип циклического префикса
PRBSet	0, 1NRB-1	Блоки размещения PDSCH
SymbolSet	0, 113	Выделенные под передачу символы
EnableHARQ	false	Возможность повторной передачи
NLayers	1	Уровни передачи
NTxAnts	1	Число передающих антенн
NumCW	1	Число кодовых слов
TargetCodeRate	0.4785	Кодовая скорость
Modulation	QPSK	Тип модуляции
NRxAnts	1	Число приемных антенн

Таблица 2 – Параметры используемого PDSCH

Таблица 3 – Параметры DM-RS, сопровождающего PDSCH

Параметр DM-RS	Значение	Комментарий
PDSCHMappingType	А	Тип меппинга
DMRSTypeAPosition	2	Символ стартового

Окончание таблицы 3

DMRSLength	2	Количество символов
DMRSAdditionalPosition	1	Количество дополнительных символов

Выбор конкретных значений параметров PDSCH продиктован их значениями для тестирования, указанными в стандартах, спецификой дальнейших практических экспериментов и шириной спектра шумоподобного сигнала, накладывающегося на PDSCH [25]. Спектрограмма, изображенная на рисунке 14, соответствует шумоподобному сигналу, (б) – каналу PDSCH.



Рисунок 14 – спектрограммы шумов внешнего источника (а), канала PDSCH

(б)

Таким образом, обеспечивается наложение аддитивных шумов на канал PDSCH в одной полосе. Для исследования такой совместной работы двух систем связи проводятся три серии экспериментов. В первой серии экспериментов к сформированному сигналу добавляются аддитивные шумоподобные отсчеты; результирующий сигнал обрабатывается алгоритмами по демодуляции PDSCH. Тем самым, осуществляется работа систем связи в идеальных условиях, при отсутствии искажений, вызванных отражениями сигнала от препятствий при распространении.

Во втором случае для моделирования многолучевого распространения перед добавлением аддитивного шумоподобного сигнала PDSCH

дополнительно пропускается через численную модель многолучевого канала [26, 27]. Надо заметить, что при передаче сигналов по реальным радиоканалам приемной антенны достигает ансамбль, состоящий из прямого (если передающая антенна расположена в прямой видимости, LOS) и отраженных от препятствий лучей. Каждый луч приходит в точку приема с собственной задержкой распространения, фазой несущего колебания и величиной затухания, определяющей его амплитуду.

Стандартами для моделирования эффекта многолучевости определено два вида моделей канала: кластеризованная модель линии задержки (CDL, Clustered Delay Line) и линия задержки с ответвлениями (TDL, Tapped Delay Line), предназначенных для моделирования распространения сигнала в диапазоне от менее 1 до 100 ГГц в полосе пропускания 2 ГГц. Конфигурация каждого канала задается набором параметров. Для обеих моделей канала стандарты 5G NR определяют пять профилей задержки, обозначающихся -A, -B, -C, -D, -E. Профили задержки -D, -E, предназначены для моделирования сценария прямой видимости (LOS), профили -A, -B, -C – для сценария отсутствия прямой видимости (NLOS).

Кластеризованная модель CDL предназначена для моделирования 3-D узконаправленной каналов с учетом формы передаваемого луча, использования волн миллиметрового диапазона и возникающих волновых эффектов. Строго говоря, в момент отражения сигнала от препятствия, совокупность свойств которого называется кластером, отдельные компоненты луча обладают одинаковым групповым временем задержки и интенсивностью, однако, что важно, с несколько различными зенитными и азимутальными углами отклонения и прихода. В результате проявления волновых эффектов происходит перераспределение весов характеристики направленности луча и искажение его формы. Критически важно это оказывается при использовании MIMO и частотного диапазона FR2, когда длины излучаемых радиоволн становятся сопоставимы с размерами неоднородностей у препятствий. С

другой стороны, процедура генерации канальных коэффициентов CDL достаточно сложна.

Основные параметры определенного профиля модели CDL включают спектры разброса задержек и углов прихода и вылета (как по азимуту, так и по зениту), распределение мощностей по разным путям распространения, а также кроссовую составляющую поляризации, максимальное значение доплеровского смещения, частоту дискретизации, коэффициент ослабления самого сильного из отраженных лучей относительно луча LOS (K-factor) – для профилей LOS, количество передающих и приемных антенн.

В рамках стоящей задачи оказывается вполне достаточным использование модели канала TDL, являющейся упрощенным вариантом CDL. Модель TDL не учитывает волновые эффекты при отражении от препятствий, не существенные при использовании частот из диапазона FR1, в результате чего процедура генерации канальных коэффициентов существенно упрощается.

К числу параметров каждого профиля TDL канала относятся дискретные задержки на распространение для каждого луча и их среднеквадратичный разброс, ослабление каждого луча в дБ, минимальное ослабление мощности прямого луча (K-factor first tap, для LOS), максимальный доплеровский уход частоты, K-factor для LOS, частота дискретизации, поляризация, количество передающих и приемных антенн.

Параметры канала TDL приведены в таблице 4 и соответствуют их величинам, указанным в стандартах [26].

Параметр	Значение		Комментарий
DelayProfile	TDL-A (NLOS, 23 луча)	TDL-D (LOS, 14 лучей)	Профиль TDL
DelaySpread	75/100	30/100	Среднеквадратичный разброс задержек

Таблица 4 – Используемые параметры канала TDL

Окончание таблицы 4

MaximumDopplerShift	25/50	75/200	Максимальное допплеровское смещение
NumTransmitAntennas	1		Количество передающих антенн
NumReceiveAntennas	1		Количество приемных антенн
SampleRate	7680000 Гц		Частота дискретизации

Параметры мощности AveragePathGains и задержки прихода PathDelays для каждого луча зафиксированы и задаются в стандартах 5G NR таблично [26].

В третьей серии экспериментов (практических) используется программно-определяемое радио (SDR) PLUTO [28, 29]. Первое передающее устройство излучает сигнал PDSCH на фоне внешнего источника помех, генерируемых вторым SDR. Результирующий сигнал принимается третьим устройством SDR и обрабатывается методами приема PDSCH. Величина отношения сигнал/шум варьируется путем изменения коэффициента усиления устройства, излучающего шумоподобный сигнал. Методика проведения практического эксперимента по пропусканию сигнала через системы программно-определяемого радио ADALM-PLUTO SDR описывается в 3 главе.

В экспериментах исследуется пропускная способность системы связи, означающая долю правильно декодированных транспортных блоков, как основной показатель производительности. Наряду с пропускной способностью анализируются такой показатель качества канала, как величина вектора ошибки (EVM) и BER (средняя вероятность ошибки декодирования отдельного бита). EVM представляет собой среднеквадратичное отклонение всех демодулированных символов от ожидаемого положения на комплексной плоскости, задаваемого используемым типом модуляции. Понятие EVM поясняется на рисунке 15.



Рисунок 15 – Отклонение демодулированных точек сигнального созвездия

На рисунках 16-18 приводятся результаты численного моделирования наложения на сигнал аддитивных шумов как без учета многолучевости, так и с применением численных моделей канала и практического эксперимента по приемопередаче сигналов через системы ADALM-PLUTO SDR. На легенде графика первое число после наименования профиля канала означает среднеквадратичный разброс задержек в мс, второе – максимальное допплеровское смещение в Герцах. Все численные данные получены в результате усреднения по 100000 реализациям для численных экспериментов и 10000 для реальных экспериментов на каждую точку графика.



Рисунок 16 – Зависимость пропускной способности от отношения сигнал/шум для различных случаев распространения волн

Из рисунка 16 видно, что результаты практического эксперимента по приемопередаче сигнала через программно-определяемое радио ADALM-PLUTO SDR довольно хорошо согласуются (максимальное расхождение составляет 4%) с результатами численного моделирования для радиоканала LOS с 14 отводами TDL-D100-200. При довольно низком отношении сигнал/шум, равном 5 дБ, достигается требуемое стандартами 5G NR значение пропускной способности в 70% [26]. Такой невысокий уровень отношения сигнал/шум, соответствующий правильному декодированию, позволяет сделать довольно неожиданный и оригинальный вывод о возможности присоединения к 5G NR дополнительного канала передачи, использующего шумоподобные сигналы.

На рисунке 17 изображена зависимость EVM от соотношения сигнал/шум.





Из рисунка 17 видно, что вклад, который привносит эффект многолучевого распространения оказывается не столь существенным, что об эффективности свидетельствует процедур оценки канала И эквалайзирования, в результате которой практически полностью устраняются канальные замирания, остаются лишь неустранимые шумы. Это

подтверждается максимальным отклонением результатов моделирования для TDL-D100-200 и практического эксперимента, составляющим 1%.

На рисунке 18 показана зависимость побитовой ошибки BER от соотношения сигнал/шум, являющаяся более детальным показателем по сравнению с пропускной способностью.



Рисунок 18 – Зависимость BER от отношения сигнал/шум для различных

случаев распространения волн

Несмотря на уровень отношения сигнал/шум равный 5дБ, когда пропускная способность начинает соответствовать требованиям стандартов, из рисунка 18 следует, что уже при отношении сигнал/шум, равном 4 дБ, в передаваемых транспортных блоках практически полностью исчезают битовые ошибки.

Хочется заметить, что индикатором правильного декодирования транспортного блока, являются биты CRC. В случае, если рассчитанная контрольная сумма оказывается неправильной, на приемной стороне может быть инициирована повторная передача с различными версиями избыточности передаваемых битов данных RV sequence. Сведения об этом сообщаются абонентом базовой станции в виде битов HARQ ACK/NACK, передаваемых в восходящей линии связи. Отсюда очевидно, что передача битов HARQ играет во всей системе связи довольно существенную роль.

Третья глава посвящена передаче битов HARQ при использовании нулевого формата передачи.

2.5 Выводы по главе 2

Во 2 главе рассмотрены методы и алгоритмы генерации и демодуляции сигналов системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией и физического канала 5G NR PDSCH. Численно и экспериментально (максимальное расхождение составляет 4%) показано, что безошибочное функционирование 5G NR (70% правильно переданных транспортных блоков) совместно со внешним источником шумоподобных сигналов достигается при достаточно низком уровне отношения сигнал/шум, равном 5 дБ. На этом основании предлагается расширение систем связи 5G NR дополнительным каналом, использующим сигналы с псевдослучайной цифровой модуляцией.

3 Модификация детектора сигналов РUCCН нулевого формата

3.1 Сигналы РИССН нулевого формата

С точки зрения реализации URLLC важнейшую роль в восходящей линии связи играют служебные сигналы, отвечающие за передачу контрольной информации. Особенно это касается сигналов нулевого формата, которые используются для передачи «квиттирующих» битов сообщений HARQ-ACK и/или бита SR (Scheduling Request), обозначающего запрос абонента на выделение ресурсов для передачи данных. Короткий тип сигнала, минимальное количество используемых им ресурс-блоков, отсутствие модуляции и, как следствие, отсутствие сопровождающего DM-RS делают этот формат наиболее экономным с точки зрения использования частотновременных ресурсов радиокадра и наиболее удобным для реализации сценария URLLC. С другой стороны, эти сигналы из-за их краткости и отсутствия сопровождающего DM-RS оказываются наиболее подвержены влиянию помех, что существенно ограничивает возможность ИХ использования. Важность правильного детектирования UCI, особенно при реализации сценария URLLC, не вызывает сомнений. Действительно, ACK/NACK, неверное детектирование отчета содержащегося В «квиттирующем» бите, приводит к повторному запросу корреспондентом передачи PDSCH. Ошибка декодирования бита SR влечет за собой неверный запрос пользователя к базовой станции на выделение ресурсов для передачи пользовательских данных по восходящей линии связи PUSCH. В обоих случаях неверное обнаружение в приемнике РИССН нулевого формата, как минимум, становится причиной дополнительной задержки, что недопустимо при реализации URLLC. Как следствие, использование сигналов нулевого формата оказывается возможным только в практически идеальных условиях радиосвязи при крайне высоком отношении сигнал/шум.

3.2 Процедура генерации РИССН нулевого формата

Для передачи служебной информации UCI в восходящей линии связи физического уровня систем пятого поколения используются сигналы канала PUCCH. Для данных сигналов спецификациями 3GPP определено 5 возможных вариантов конфигурации – форматов: 0, 1, 2, 3 и 4 [30, 31]. Так называемые длинные типы форматов длиной от 4 до 14 OFDM-символов, к которым относятся 1, 3 и 4, используются для передачи сообщений при высоком уровне шума. Значительная степень избыточности передаваемой ими информации обеспечивает большую помехоустойчивость по сравнению с короткими типами форматов. Сигналы коротких типов (форматов 0 и 2), напротив, обеспечивают передачу UCI с наибольшей долей полезной нагрузки, состоят из 1 или 2 OFDM-символов и предназначены для использования при идеальных условиях связи.

Обработка сигналов форматов 1-4 приемным алгоритмом основывается на использовании сопутствующих этим форматам референсных сигналов DM-RS. Применение DM-RS позволяет обеспечить временную и частотную синхронизацию передатчика с приемником, провести процедуру оценки канала, а также эквалайзирование отсчетов принятого сигнала.

Сигналы нулевого формата предназначены для передачи контрольных сообщений UCI минимальной длины в условиях высокого качества канала связи. Закодированная в них информация представляет собой «квиттирующий бит» HARQ-ACK/NACK, подтверждающий правильность декодирования информации, переданной по нисходящей линии связи, и/или бит SR, являющийся запросом к базовой станции на выделение абоненту радиоресурсов. Эти сигналы не сопровождаются сигналами DM-RS. Как следствие, оценка канала с последующей синхронизацией по частоте и времени, и выравниванием отсчетов принятого сигнала для этих сигналов невозможна.

Первым этапом формирования сигнала является вычисление фазового сдвига в соответствии с (17):

$$\alpha(m) = \frac{\pi}{6} (M^{\Sigma}(m) \bmod 12), \qquad (17)$$

где $M^{\Sigma}(m) = m + m_{int} + n_{sc}$ — фаза полного циклического сдвига, складывающаяся из индекса m, однозначно определяемого битами UCI сообщения, начальной фазы m_{int} , задаваемой параметром более высокого уровня, номера слота в радиокадре, задающего сдвиг n_{sc} . При этом индекс m, задаваемый в стандарте таблично и полностью определяемый содержанием контрольного сообщения, для обеспечения краткости сигналов нулевого формата имеет ограниченное число заранее известных вариантов.

Помехоустойчивое кодирование базовой последовательности осуществляется путем применения рассчитанного в (17) циклического сдвига α в соответствии с (18):

$$r_m(n) = e^{i\alpha n} \bar{r}(n), \tag{18}$$

где $\bar{r}(n)$ – базовая комплекснозначная последовательность длиной 12 отсчетов – число поднесущих частот в одном ресурс-блоке для стандарта New Radio, n = 0, 1..11 – номер отсчета.

Таким образом, последовательность комплекснозначных отсчетов $r_m(n)$ представляет собой циклически сдвинутую копию $\bar{r}(n)$ с величиной фазы α , определяемой, в основном, битами UCI.

Окончательно, формирование последовательности 0 формата осуществляется путем следующей выборки отсчетов последовательности с низким уровнем PAPR $r_m(n)$:

$$x_m(l \cdot 12 + n) = r_m(n)$$
(19)

где
$$l = \begin{cases} 0 - для \ 1 \ OFDM - символа \\ 0, 1 - для \ 2 \ OFDM - символов \end{cases}$$

Полученная в результате последовательность комплексных отсчетов $x_m(n)$ во времени на следующем этапе отображается по ячейкам ресурсной сетки с отсчетами по частоте и по времени.

Последним этапом формирования сигнала является OFDM-модуляция, сводящаяся, по сути дела, к применению обратного дискретного преобразования Фурье к отсчетам ресурсной сетки.

3.3 Процедура декодирования РИССН нулевого формата

На приемной стороне противоположные процедуры (по сравнению с формированием сигнала) выполняются в обратном порядке. Процедура OFDM-демодуляции путем применения дискретного преобразования Фурье преобразует сигнал во временной области в отсчеты ресурсной сетки. В свою очередь, отсчеты извлекаются из ячеек сетки ресурсов и образуют в порядке, определяемом их индексами, закодированную с фазовым сдвигом α последовательность комплексных отсчетов. Для обнаружения в ней сигнала корреляционный нулевого формата используется прием. Каждый коэффициент корреляционной матрицы является результатом свертки декодированной последовательности с одной из последовательностейкандидатов $x_m^*(k)$:

$$C_m = \frac{1}{N_r} \sum_{r=0}^{N_r - 1} \left| \frac{1}{12} \sum_{k=0}^{11} R_r(k) x_m^*(k) \right|^2,$$
(20)

где N_r – количество приемных антенн, $R_r(k)$ – декодированная последовательность РИССН нулевого формата, $x_m^*(k)$ – комплексносопряженные отсчеты последовательности $x_m(n)$.

Если принятая последовательность содержит сигнал нулевого формата, $C_m^{max} = max (C_m),$ соответствующий выражение (20)имеет пик последовательности с номером *m*. В противном случае все значения выражения (20) малы ввиду некоррелированности сворачиваемых сигналов. Решение о наличии или отсутствии в принятом сигнале последовательности PUCCH нулевого формата принимается на основании сравнения максимального элемента корреляционной матрицы $C_m^{max} = max(C_m)$ с предварительно заданным критерием обнаружения, пороговым значением М. Стандартами 3GPP определены допустимые вероятности событий, имеющих

место при ошибочном задании значения порога, «ложной тревоги» (DTX to ACK probability) и «пропуска цели» (ACK missed detection probability). Под «ложной тревогой» понимается случай ошибочного решения об обнаружении вследствие низкого порогового значения при отсутствующем сигнале РИССН нулевого формата. Допустимый уровень вероятности «ложной тревоги» стандартами систем связи 5G NR определен менее чем в 1% [32]. Вариант случаю, «пропуска цели» соответствует когда В принятом сигнале присутствует РИССН сигнал нулевого формата, но обнаружения из-за высокого уровня порога не происходит. Вероятность этого события в соответствии со стандартами 3GPP должна составлять не более 1% по уровню отношения сигнал/шум в 9.3 дБ.

Для исследования соответствия алгоритма (21) требованиям стандартов проводились два численных эксперимента по генерации, пропусканию через численную модель радиоканала, наложению аддитивных шумов и приему сигналов нулевого формата. В качестве линии передачи для моделирования эффекта многолучевого распространения в экспериментах использовалась модель TDL профиля -С, имитирующая радиоканал из 24 лучей без прямой видимости между приемником и передатчиком. Величина среднеквадратичного разброса задержек составляла 300 нс, максимальное доплеровское смещение выбиралось равным 100 Гц.

Первый численный эксперимент заключался в исследовании зависимости вероятности «пропуска цели» от соотношения сигнал/шум для различных значений порога *M*. Из соответствующего ему рисунка 19 видно, что требования спецификаций 3GPP выполняются при фиксированном значении порога, меньшем 0.15. Столь низкое значение порога приводит к риску ошибочного обнаружения PUCCH даже в случае некоррелированности сворачиваемых сигналов.





Во втором эксперименте сигнал РUCCH не передавался. Полученная зависимость коэффициентов корреляционной матрицы C_m^{max} от соотношения сигнал/шум представлена на рисунке 20.



Рисунок 20 – Зависимость коэффициентов C_m^{max} от соотношения сигнал/шум

Явная зависимость коэффициентов C_m^{max} от соотношения сигнал/шум, очевидная из рисунка 20, не позволяет подобрать универсальное значение порога обнаружения. Поэтому требования стандартов, накладываемые на вероятность «ложной тревоги», не могут быть выполнены.

Окончательно в невозможности задания фиксированного порога убеждают результаты, приведенные на рисунок 21, где изображена зависимость вероятности «ложной тревоги» от соотношения сигнал/шум для различных значений порога *M*.



Рисунок 21 – Зависимость вероятности «ложной тревоги» от соотношения сигнал/шум

Значительная подверженность коэффициентов C_m^{max} влиянию шумов (рисунок 20) приводит к сильной взаимосвязи между вероятностью «ложной тревоги» и отношением сигнал/шум, как это видно из рисунка 21. Таким образом, невозможно подобрать универсальное значение порога, которое не позволяет добиться вероятности «ложной тревоги» меньше 1% независимо от соотношения сигнал/шум.

3.4 Численные эксперименты по апробации предлагаемой методики детектирования

Полученные результаты приводят к необходимости модификации существующего алгоритма детектора РUCCH нулевого формата. Модификация должна учитывать, что для сценария «ложной тревоги» значение C_m^{max} определяется исключительно дисперсией накладываемого в радиоканале шума, величиной случайной, и поэтому не должно зависеть от

соотношения сигнал/шум. Поэтому коэффициенты корреляционной матрицы предлагается пересчитать согласно (22) [33]:

$$\Gamma_m = \frac{C_m^{max}}{C_m} \tag{22}$$

В случае отсутствующего сигнала нулевого формата коэффициенты Γ_m практически не отличаются от 1, поскольку перестают зависеть от величины C_m^{max} , напрямую связанной с амплитудой принятого сигнала, и обусловлены только взаимной энергией шума. При присутствующем сигнале PUCCH значения Γ_m , как и C_m^{max} велики, так как определяются энергией полезного сигнала в принятой последовательности отсчетов. Таким образом, для данной модификации детектора остается только задать оптимальное значение порога, поскольку решение об обнаружении по-прежнему базируется на сравнении рассчитанных коэффициентов с пороговым значением. Для определения оптимального значения порога *L* проводится ряд численных и реальных экспериментов.

В экспериментах исследуется зависимость вероятностей «ложной тревоги» и «пропуска цели» от соотношения сигнал/шум на предмет соответствия требованиям стандартов 3GPP. Для реализации сценария «пропуска цели» генерируется сигнал со следующими параметрами.

Таблица 5 – Параметры генерируемого сигнала для исследования сценария «пропуска цели»

Название параметра	Значение	Примечание
Channel bandwidth	5 MHz	Ширина полосы частот радиоканала
SCS	15 KHz	Разнесение поднесущих
FFT window	512	Длина дискретного преобразования Фурье
UCI size	1 Bit	Длина передаваемого сообщения UCI
Number of PRBs	1	Количество ресурс-блоков для передачи
No. of Tx antennas	1	Количество передающих антенн
Окончание таблицы 5

No. of Rx antennas	2	Количество приемных антенн
Initial cyclic shift	0	Величина начального сдвига m_{int}

Случай «ложной тревоги» подразумевает отсутствие сигнала нулевого формата в принятом радиокадре, поэтому для его исследования используется сигнал PUCCH 3 формата, а количество OFDM-символов в слоте радиокадра увеличено до 6.

В первом численном эксперименте для ряда пороговых значений исследуется зависимость вероятности «пропуска цели» от соотношения сигнал/шум. Вероятность «пропуска цели», изображенная в каждой точке графика, получена в результате усреднения по 100000 реализациям приема сигнала.



Рисунок 22 – Зависимость вероятности «пропуска цели» от соотношения сигнал/шум для модификации детектора РUCCH

Из рисунка 22 видно, что требования стандартов 5G NR для пропуска цели выполняются для значений порога *L* ≤ 6.

Во втором численном эксперименте для ряда пороговых значений исследуется зависимость вероятности «ложной тревоги» от соотношения сигнал/шум.





Из рисунка 23 видно, что требования стандартов на вероятность «ложной тревоги» всегда меньшую 1% выполняются при $L \ge 4$. Таким образом, значение порога L = 4 по результатам обоих численных экспериментов является оптимальным.

Упомянутые требования стандартов сформулированы для 2 приемных антенн, для 1 приемной антенны аналогичные требования отсутствуют; в то же время в практических условиях используется только одна приемная антенна. Для сопоставления результатов численных и практических экспериментов проводятся численные эксперименты, аналогичные представленным выше, для 1 приемной антенны.

3.5 Практические эксперименты по апробации предлагаемой методики детектирования

Практические эксперименты проводятся с использованием программноопределяемого радио SDR ADALM-PLUTO, возможности которого позволяют передавать и принимать сигналы в частотном диапазоне от 325 до 3800 МГц с максимальной частотой дискретизации 61.44 МГц.

Частота дискретизации сигнала определяется стандартами 3GPP как

Sampling Rate = $1000 * NFFT * \Delta f = 7680000$ отсчетов в секунду, (23)

где $NFFT = \max\left(128, 2^{ceil\left(\log_2\left(NRB*\frac{12}{0.85}\right)\right)}\right) = 512 - число точек OFDM-$

модулятора,

NRB – количество ресурсных блоков,

 $\Delta f = 15 * 2^{\mu}$ КГц = 15 КГц – расстояние между поднесущими частотами, $\mu = 0, 1, 2, 3$ или 4 – нумерология.

Таким образом, время дискретизации равно

$$T = N_{Frame}^{Samples} / Sampling Rate = 0.001 c, \qquad (24)$$

где $N_{Frame}^{Samples} = 76800$ – количество отсчетов в одном радиокадре.

Центральная частота составляет 1.5 ГГц и принадлежит группе частот FR1, определенных стандартами для восходящей линии связи.

Центральные частоты передающего и приемного SDR в реальном эксперименте не совпадают из-за неидеальности их заводских настроек и конструктивного исполнения, следствием проявления которых является некая разница Δf_c , т.н. frequency offset.

Решением является компенсация частотного сдвига путем приемопередачи референсного гармонического сигнала, осуществляемой перед каждой серией реализаций РИССН, и последующего вычисления масштабного коэффициента.

Алгоритм вычисления этого коэффициента состоит в следующем.

1) Низкочастотный гармонический сигнал с частотой f_{ref} появляется в приемнике с частотой $f_{received}$:

$$f_{received} = \frac{f_{ref} + (f_c - k \cdot f_c)}{k},\tag{25}$$

где k – близкий к 1 масштабный коэффициент, связывающий центральные частоты передатчика и приемника соотношением: $f_c' = k * f_c$.

2) Отсюда коэффициент k:

$$k = \frac{f_{ref} + f_c}{f_{received} + f_c}.$$
(26)

 3) Масштабирование с коэффициентом ¹/_k, который для наглядности переводится в миллионные доли, частоты приемника позволяет удалить частотный сдвиг.

$$1 + \frac{p}{10^6} = \frac{1}{k},\tag{27}$$

откуда р находится как

$$p = \frac{f_{received} - f_{ref}}{f_{ref} + f_c} * 10^6.$$
⁽²⁸⁾

При передаче сигнала на центральной частоте $f_c = 1.5$ ГГц для одной из реализаций масштабный коэффициент составил p = 9.2687 ppm. Таким образом, реальная разница центральных частот для используемых в работе передатчика и приемника колеблется в окрестности примерно 14 КГц.

В условиях практического эксперимента невозможно обеспечить одновременное включение передатчика и приемника, поэтому место начала отсчетов радиокадра в принятой последовательности комплексных символов неизвестно. Иными словами, требуется обеспечение временной синхронизации, для чего в символах каждого слота, смежных с символами РUCCH, передается общий физический канал PUSCH. При декодировании принятого сигнала приемными алгоритмами PUSCH производится свертка

принятой последовательности отсчетов с эталонными символами DM-RS, известными на приемной стороне. В результате первому отсчету в радиокадре соответствует значение корреляционной функции с наибольшей амплитудой. На рисунке 24 представлен пример взаимной корреляции известной последовательности референсных отсчетов DM-RS с принятой последовательностью.



Рисунок 24 – Временная зависимость амплитуды автокорреляционной функции

В соответствии с найденным смещением из принятой последовательности отсчетов извлекается фрагмент, образующий полный слот. Дальнейшая обработка этого слота осуществляется при использовании приемного алгоритма PUCCH.

Значение отношения сигнал/шум в практическом эксперименте вычисляется на основании оценки канала PUSCH, производимой на основе DM-RS.

В результате пропускания сигнала с указанными в таблице 5 для одной приемной антенны параметрами через PLUTO для одной конкретной реализации были получены следующие осциллограммы.



Рисунок 25 – Временная зависимость действительной части сгенерированного PUCCH сигнала



Рисунок 26 – Временная зависимость действительной части принятой



Рисунок 27 – Временная зависимость действительной части амплитуд фрагментов передаваемого и принятого сигналов

Сигнал передается без ошибок по частоте и времени, как это видно из отсчетов на рисунка 26, соответствующих нулевому уровню сгенерированного сигнала, и из рисунка 27. Минимальный уровень искажений соответствует внутренним шумам SDR.

Результаты

Полученные путем усреднения по 100000 реализаций в каждой точке графика для численного и по 10000 реализаций для практического эксперимента зависимости вероятностей «пропуска цели» и «ложной тревоги» представлены на рисунках 28 и 29.



Рисунок 28 – Зависимость вероятности «пропуска цели» от соотношения сигнал/шум для ряда пороговых значений *L*

Среднее расхождение результатов численных и реальных экспериментов для каждого порогового значения L = 2, 3, 4, 5, 6 составляет 4, 4, 5, 6, 9 % соответственно.



Рисунок 29 – Зависимость вероятности «ложной тревоги» от соотношения сигнал/шум для ряда пороговых значений *L*

Среднее расхождение результатов численных и реальных экспериментов по исследованию случая «ложной тревоги» для каждого порогового значения L = 2, 3, 4, 5, 6 составляет 4, 3, 2, 2, 2 % соответственно.

Таким образом, из рисунков 28 и 29 видно, что полученные в реальном эксперименте результаты в значительной степени согласуются с численными, аналогичными полученным ранее для 2 приемных антенн и удовлетворяющими требованиям стандартов. По результатам апробации в реальном эксперименте можно сделать вывод о полной работоспособности предлагаемой модификации с пороговым значением L = 4.

3.6 Выводы по главе 3

В третьей главе рассмотрены сигналы РUCCH различных форматов. Описаны существующая процедура детектирования РUCCH нулевого формата, для исследования которой проводится серия численных экспериментов. Предложен способ модификации существующей методики детектирования. Работоспособность этой модификации подтверждена в численных экспериментах. Для сопоставления результатов численного моделирования и реального эксперимента условия первого адаптированы в соответствии с новыми требованиями. Показано, что результаты численного

эксперимента, для которого ранее было продемонстрировано соответствие требованиям стандартов, хорошо согласуются с результатами реальной апробации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы были получены следующие основные результаты.

1) Проведен обзор методов и алгоритмов обработки цифровых сигналов на физическом уровне систем связи 5G NR. Разработан комплекс алгоритмов и программ, реализующих генерацию и демодуляцию сигналов стандарта 5G NR.

2) Разработано тестовое программное обеспечение, реализующее весь комплекс алгоритмов формирования и обработки сигналов в системах связи пятого поколения.

3) Численно и экспериментально показано, что при совместной работе на одной частоте 5G NR с источником внешних шумовых сигналов безошибочный прием, заданный в стандартах 5G NR по уровню 70% от общего числа передач, достигается при достаточно низком отношении сигнал/шум, равном 5 дБ. Предложено использовать сигналы системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией В 5G NR лля передачи дополнительной информации.

4) Предложена модификация методики детектирования контрольных сообщений в восходящей линии связи. Численно и экспериментально (с расхождением в 5%) показано, что при использовании предлагаемой модификации с пороговым значением M = 4 удается достичь требуемых стандартом 5G NR значений вероятностей «ложной тревоги» и «пропуска цели».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1) The 5G business potential; Industry digitalization and the untapped opportunities for operators 2017.

2) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665979 Российская Федерация. Формирование синхросигналов мобильной связи стандарта 5G NR : № 2020664689 : заявл. 23.11.2020 : опубл. 02.12.2020 / И. Ю. Кузьменко, Д. С. Кокин, И. А. Киселев [и др.] ; заявитель Акционерное общество "Научно-производственная фирма "Микран". – EDN VMHCEU.

3) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669120 Российская Федерация. Программа анализа сигналов 5G Uplink : № 2021668573 : заявл. 18.11.2021 : опубл. 24.11.2021 / А. А. Демина, И. О. Сабанова, И. Ю. Кузьменко [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран». – EDN GVYNHS.

4) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021669191 Российская Федерация. Программа анализа сигналов 5G
Downlink : № 2021668538 : заявл. 18.11.2021 : опубл. 24.11.2021 / А. А. Демина,
И. О. Сабанова, И. Ю. Кузьменко [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран». – EDN YKBUVA.

5) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669422 Российская Федерация. Программа формирования сигналов 5G Downlink : № 2021668555 : заявл. 18.11.2021 : опубл. 29.11.2021 / А. А. Демина, И. О. Сабанова, И. Ю. Кузьменко [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран». – EDN PEWCPC.

6) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2022612340 Российская Федерация. Программа формирования сигналов 5G
Uplink : № 2022611486 : заявл. 04.02.2022 : опубл. 10.02.2022 / А. А. Демина,
Д. С. Кокин, В. Ф. Жаринов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран». – EDN XKFJTA.

7) Why Network Slicing will lead to 5G-readiness – [электронный ресурс]. URL:

<u>https://www.diameterrouting.com/blogs/WhyNetworkSlicingwillleadto5Greadines</u> <u>s</u> (дата обращения 02.06.2022).

8) 5G/NR – Radio Protocol Stack Architecture – [электронный ресурс]. – URL:

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_RadioProtocolStackArchitecture.html (дата обращения 02.12.2022).

9) ETSI TS 138 201. 5G; NR; Physical layer; General description (3GPP TS 38.201 version 15.0.0 Release 15).

10) ETSI TS 138 202. 5G; NR; Services provided by the physical layer (3GPP TS 38.202 version 15.4.0 Release 15).

11) ETSI TS 138 211. 5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16).

12) ETSI TS 138 212. 5G; NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 15.2.0 Release 15).

13) ETSI TS 138 213. 5G; NR; Physical layer procedures for control (3GPP TS 38.213 version 15.3.0 Release 15).

14) ETSI TS 138 214. 5G; NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 16.2.0 Release 16).

15) ETSI TS 138 215. 5G; NR; Physical layer measurements (3GPP TS 38.215 version 16.2.0 Release 16).

16) Zaidi A., Athley F., Medbo J., Gustavsson U., Durisi G, Chen X. 5G Physical Layer, Principles, Models and Technology Components. – Elsevier, 2018.– 324 p.

17) 5G/NR-PDSCH–[электронный ресурс].–URL:https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_PDSCH_DMRS.html(датаобращения 02.12.2022).

18) PTRS 5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless. Xingqin Lin, Jingya Li, Robert Baldemair, Thomas Cheng, Stefan Parkvall, Daniel Larsson, Havish Koorapaty, Mattias Frenne, Sorour Falahati, Asbjörn Grövlen, Karl Werner Access Technology https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.06898.pdf

19) 5G/NR - CSI RS – [электронный ресурс]. – URL: <u>https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_CSI_RS.html</u> (дата обращения 02.12.2022).

20) 5G/NR - SS Block – [электронный ресурс]. – URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_SS_Block.html (дата обращения 02.12.2022).

21) Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press, 2018. – 466 p.

22) Kokin, D. S. Time and phase synchronization in communication system with a digital pseudo-random modulation / D. S. Kokin, O. G. Ponomarev // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 04 2020 года. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22018. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/2/022018. – EDN IGTHTN.

23) Кокин, Д. С. Оценка соотношения между длиной коррелятора и числом абонентов в системе связи с цифровой псевдослучайной модуляцией / Д. С. Кокин, О. Г. Пономарев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 38-43. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-3-38-43. – EDN ESLRBC.

24) Жаринов, В. Ф. Система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией для реализации интернета вещей / В. Ф. Жаринов, Д. С. Кокин, О. Г. Пономарев // Решетневские чтения : Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том Часть 2. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский

государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 310-312. – EDN MHKSNW.

25) ETSI TS 138 101-4. 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 4: Performance requirements (3GPP TS 38.101-4 version 16.4.0 Release 16).

26) ETSI TR 138 901. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16).

27) Sandip Jana, Amit Kumar Mishra, Mohammed Zafar Ali Khan. Sensing the Environment with 5G Scattered Signals (5G-CommSense): A Feasibility Analysis. 10 Jan 2023.

28) П. Руднев. Технологии SDR на службе у разработчиков систем// ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 7/2009. С. 52-54.

29) Brian LEEMAN. SDR implementation of OFDM CW EMI removal algorithm. Electrical Engineering Technology at KU, Holland, Leuven, 2021.

30) Degree project in electrical engineering, second cycle, 30 credits, Optimization of Physical Uplink Resource Allocation in 5G Cellular Network using Monte Carlo Tree Search / Optimering av fysisk resurstilldelning för uppkoppling i 5G-cellulärt nätverk med hjälp av Monte Carlo Tree Search, GERARD GIRAMÉ RIZZO, STOCKHOLM, SWEDEN 2021.

31) Kundu L., Xiong G., Cho J., Physical uplink control channel design for 5g new radio, in 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), Jul. 2018, pp. 233–238.

32) ETSI TS 38.104. 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP, TS 38.104 version 16.4.0 Release 16).

33) Пономарев О.Г., Асаф Мохаммад. Модификация алгоритма детектирования сигнала PUCCH нулевого формата в системе связи 5G NR //Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 44-49.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Отчет о патентных исследованиях

УТВЕРЖДАЮ

 $D_{I} =$

/Д.Я. Суханов/

должность, личная подпись и расшифровка подписи руководителя ООП

«15» сентября 2021г.

ЗАДАНИЕ на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы): <u>Экспериментальная апробация методов повышения помехоустойчивости</u> систем связи 5G NR.

Шифр работы (темы) ЦОС

Этап работы: первый, сроки его выполнения: 16.09.2021 - 14.12.2021

Задачи патентных исследований: поиск новых методов повышения помехоустойчивости систем связи 5G NR; поиск существующих программно-аппаратных решений в области передачи и приема сигналов стандарта 5G NR.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения- исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований	Отчетные документы
1. Поиск новых методов повышения помехоустойчивости систем связи 5G	Кафедра радиофизики ТГУ	Жаринов В.Ф.	16.09.2021-14.10.2021	Отчет о поиске
2.Поиск программно- аппаратных решений, реализующих передачу сигналов стандарта 5G NR	Кафедра радиофизики ТГУ	Жаринов В.Ф.	15.10.2021-14.11.2021	Отчет о поиске
2.Поиск программно- аппаратных решений, реализующих прием сигналов стандарта 5G NR	Кафедра радиофизики ТГУ	Жаринов В.Ф.	15.11.2021-14.12.2021	Отчет о поиске

Руководитель патентного подразделения

200 личная подписы

личная подпись

Руководитель ВКР магистра <u>О.Г. Пономарев</u> расшифровка подписи

В.П. Беличенко

расшифровка подписи

12.09.21

12.09.21

дата

дата

Регламент поиска

20.09.2021

дата составления регламента

Наименование работы (тема): Экспериментальная апробация методов повышения помехоустойчивости систем связи 5G NR

Шифр работы (темы) <u>ЦОС</u> Номер и дата утверждения задания <u>от 15.09.2021</u> Этап работы <u>первый</u> Цель поиска информации (в зависимости от задач патентных исследований, указанных в задании): <u>поиск новых методов повышения помехоустойчивости систем связи 5G NR; поиск существующих программно-аппаратных решений в области передачи и приема</u>

сигналов стандарта 5G NR.

Обоснование регламента поиска: проведение поиска в базах ФИПС и USPT
Начало поиска: <u>16.09.2021</u> , окончание поиска: <u>14.12.2021</u>

Предмет поиска (объект исследования, его составные части, товар)	Страна поиска	Источники информ провод	Ретроспективность	Наименование информационной базы	
		Патентные	НТИ		

		Наименование	Классификацио нные рубрики МПК	Наименование	Рубрики УДК		
1	2	3	4	5	6	7	8
5G New Radio помехоустойчивость. Передатчик сигналов стандарта 5G NR. Приемник сигналов стандарта 5G NR. 5G New Radio interference immunity. 5G NR signal transmitter. 5G NR signal receiver.	Россия, США	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)	МПК Н04L Н04W Н04B Н03M	Том. гос. ун-т.Цифровая обработка сигналов.Электросвязь.Јournal of Physics.IEEE communications magazineAcademic PressIEEE 5G World Forum (5GWF)IEEE 5th International Conference on Computer and Communications	УДК 621.376 УДК 621.396.2 doi 10.1088/1742- 6596/1889/2/0220 91 doi 10.1109/ICCC470 50.2019.9064241	1994-2021 (Россия) 1980-2021 (США)	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)
				University Press			

Руководитель

	(
ВКР магистра	личная подпись	О.Г. Пономарев	<u>20.09.21</u> дата
Руководитель Патентного подразделения	Ввент личная подпись	<u>В. П. Беличенко</u>	<u>20.09.21</u> дата
	0'	гчет о поиске	

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием

<u>от 15.09.2021</u> и Регламентом поиска № <u>от 20.09.2021</u>

В.2 Этап работы первый

В.3 Начало поиска: <u>16.09.2021;</u> окончание поиска: <u>14.12.2021</u>

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска,

отступления от требований регламента, причины этих отступлений) – регламент поиска выполнен полностью.

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований – Более детально проанализировать направления

исследований научных групп в области методов повышения помехоустойчивости и их программно-аппаратной реализации.

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица 1 – Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс.	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
5G New Radio помехоустойчиво сть. Передатчик	Патент РФ № 2 732 620, МПК H04W 72/12 (2009.01) H04B 1/525 (2015.01) H04W 24/10 (2009.01)	Бейдзин Сяоми Мобайл Софтвэр Ко., Лтд. (CN). 2020100854, 07.07.2017	Способ и устройство согласования помех, базовая станция и пользовательское оборудование	Действует
сигналов стандарта 5G NR. Приемник сигналов стандарта 5G NR.	Патент РФ № 2 674 755, МПК H04W 4/00 (2009.01)	РИАРДЕН, ЛЛК (US), 2015144318, Конвенционный приоритет: 15.03.2013 US 13/844,355	Системы и способы радиочастотной калибровки с использованием принципа взаимности каналов в беспроводной связи с распределенным входом- распределенным выходом	Действует
5G New Radio interference immunity. 5G NR signal	Патент РФ № 2 675 383, МПК H04L 25/03 (2006.01)	РИАРДЕН, ЛЛК (US), 2015143188, Конвенционный приоритет: 12.03.2013 US 13/797,971	Системы и способы использования межсотового прироста мультиплексирования в беспроводных сотовых системах посредством технологии распределенного входа-распределенного выхода	Действует
transmitter. 5G NR signal receiver.	Патент РФ RU (11) 2 758 801 МПК	ШАРП КАБУСИКИ КАЙСЯ (ЈР), ЭфДжи ИННОВЕЙШН КОМПАНИ ЛИМИТЕД (CN)	Конструкция короткого физического канала управления восходящей линии связи (PUCCH) для новой радиосети (NR) 5-го поколения (5G)	Действует

	2019126927, 30.01.2018 Конвенционный приоритет:; 02.02.2017 US 62/453,944		
Патент РФ № 2 747 389, МПК H04L 1/18 (2006.01) H04W 72/12 (2009.01)	ЗедТиИ КОРПОРЕЙШН (CN), 2020110021, 11.08.2017	Способ и оборудование для выделения ресурсов при беспроводной связи	Действует
Патент РФ № 2 718 171 МПК Н03М 13/11 (2006.01)	КВЭЛКОММ ИНКОРПОРЕЙТЕД (US) Конвенционный приоритет:; 12.05.2016 US 62/335,163; 11.05.2017 US 15/593,035	УЛУЧШЕННОЕ ВЫКАЛЫВАНИЕ И СТРУКТУРА КОДА С МАЛОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПРОВЕРОК НА ЧЕТНОСТЬ (LDPC)	Действует
Патент РФ № 2 729 777 H04W 72/04 (2009.01) H04W 16/14 (2009.01)	ТЕЛЕФОНАКТИЕБОЛАГ ЕТ ЛМ ЭРИКССОН (ПАБЛ) (SE) 2019133788 Конвенционный приоритет: 24.03.2017 CN PCT/CN2017/078077	СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ	Может прекратить свое действие
Патент США № 10,979,208, МПК H04L 7/02 (20060101) H04L 7/00 (20060101)	Bogdan John W. (USA) Заявка № 16/882,742 May 25, 2020	Digital time processing	Действует

Патент США № 11,206,595, МПК H04W 36/32 (20090101) H04W 8/12 (20090101) H04W 4/029 (20180101) H04W 48/16 (20090101)	QUALCOMM Incorporated (USA) Заявка № 16/993,142 August 13, 2020	Systems and methods for handover of 5G location sessions for an NG-RAN location management component	Действует
Патент США № 11,166,202 МПК Н04W 4/00 (20180101) Н04W 36/08 (20090101) Н04W 36/12 (20090101) Н04W 36/00 (20090101)	QUALCOMM Incorporated (USA) Заявка № 17/248,099 November 2, 2021	Voice fallback in 5G NR	Действует
Патент США № 11,115,877 МПК H04W 36/00 (20090101) H04W 36/30 (20090101) H04W 36/26 (20090101)	T-Mobile USA, Inc. (USA) Заявка № 16/372,396 September 7, 2021	Communication fallback in 5G systems and methods	Действует
Патент США № 11,005,620 МПК H04W 4/00 (20180101) H04L 5/00 (20060101) H04L 27/26 (20060101)	QUALCOMM Incorporated (USA) Заявка № 16/008,908 May 11, 2021	Uplink reference signal sequence design in 5G new radio	Действует

Таблица 2 – Научно-техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчеты о

научно-исследовательских работах)

Наименование источника информации	Автор, фирма (держатель)	Год место и орган издания
с указанием страницы источника	технической документации	(утверждения, депонирования
		источника)
2	3	4
-	Наименование источника информации с указанием страницы источника 2	Наименование источника информации с указанием страницы источника Автор, фирма (держатель) технической документации 2 3

5G New Radio помехоустойчивость. 5G NR синхронизация.	Цифровая модуляция сигналов, с. 35-41	Пономарев О.Г.	Том. гос. ун-т Томск: [б. и.], 2010.
	Модификация алгоритма детектирования сигнала PUCCH нулевого формата в системе связи 5G NR	Асаф М., Пономарев О.Г.	Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3.
	Компенсация смещения частоты дискретизации в восходящем канале системы сотовой связи пятого поколения	Асаф М., Пономарев О.Г.	Электросвязь. 2021.
	Sample Clock Offset Compensation in the Fifth-Generation New Radio Downlink.	Assaf M., Ponomarev O. G.	Journal of Physics: Conference Series, vol. 1889, no. 2, 2021.
	The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile communication. p. 36-44	Chen S., Zhao J.	<i>IEEE communications magazine, vol.</i> 52, no. 5, May 2014
	5G NR: The next generation wireless access technology.	Dahlman E., Parkvall S., Skold J.	Academic Press, 2018.
	Physical uplink control channel design for 5g new radio	Kundu L., Xiong G., Cho J.	2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), Jul. 2018
	An improved semi-blind detection algorithm for nr pucch	Du Y., He W., Long H.	2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Dec. 2019
	5G Physical Layer, Principles, Models and Technology Components. p. 108-211	Ali Zaidi, Fredrik Athley, Jonas Medbo, Ulf Gustavsson, Giuseppe Durisi	

5G Mobile and Wireless Communications Technology. p. 94- 132.	Osseiran A., Monserrat J. F., Marsch P.	Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2016.
Временная и фазовая синхронизации в системе связи с псевдослучайной цифровой модуляцией	Кокин Дмитрий Сергеевич Пономарев Олег Геннадьевич	Томский государственный университет, АПР 2019 Физика радиоволн: излучение, прием и использование

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами патентного поиска по теме диссертации был проведен поиск патентной и научно-технической документации, относящейся к следующим вопросам: поиск новых методов повышения помехоустойчивости систем связи 5G NR; поиск существующих программно-аппаратных решений в области передачи и приема сигналов стандарта 5G NR.

Поиск патентной документации произведен в базах данных патентной информации патентных ведомств России (ФИПС) и США (USPTO). Глубина осуществленного поиска (27 лет в ФИПС и 41 год в USPTO) позволила сформировать полноценную картину проведения научных исследований и патентования в области помехоустойчивости систем мобильной связи пятого поколения в России и США. Причем поиск в американской базе данных USPTO, являющейся знаком качества, показал выявил ряд патентов из других стран (Китай, Австрия, Швеция), что почти наверняка свидетельствует о факте их патентования и в национальных ведомствах.

Отмечена особая активность следующих американских фирм и организаций:

- QUALCOMM INCORPORATED;

- РИАРДЕН, ЛЛК.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



POCCININCICASI ODELLEPAULINI



о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021669191

Программа анализа сигналов 5G Downlink

Правообладатель: Акционерное общество «Научнопроизводственная фирма «Микран» (RU)

路路路路路

路路

器

器

器

密

资

密

资

密

密

密

密

密

密

资

资

斑斑

密

密

斑

密

函

密

密

密

密

路路

發發路路

盗

器

密

器

發發發發發發

斑

斑

Авторы: Демина Анна Андреевна (RU), Сабанова Ирина Олеговна (RU), Кузьменко Иван Юрьевич (RU), Пономарёв Олег Геннадьевич (RU), Кокин Дмитрий Сергеевич (RU), Жаринов Вячеслав Федорович (RU), Мохаммад Асаф (SY)



Дата поступления **18 ноября 2021 г.** Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **24 ноября 2021 г.**

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Villece

Г.П. Ивлиев

路路路路路路

密

密

斑

路路

器

密

器

密

器

密

密

密

密

路路

密

密

密

密

斑

密

密

路路

器

密

路路路路路路路

密

密

器

器

密

路路

密

密

盗

游戏游戏游戏游戏游戏游戏游戏游戏游戏漫戏漫戏游戏的游戏

POCCHIÄCKAN DEMEPAIINI

路路路路路路

器

路

密

超超超超

斑

強路

發發

發發發發發發

密

密

緻

资

斑斑

密

器

器

密

密

器

盗

盗

密

盗

器

器

密

盛盛盛盛盛

密

密



路 路 路 路 路 路 路

密

资

發發發發發發

發發發發發發發發發發

器

路

密

密

器

路路

密

密

斑

墢

斑

巖

巖

棗

斑

斑

發發發發發發發發

器

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021669120

Программа анализа сигналов 5G Uplink

Правообладатель: Акционерное общество «Научнопроизводственная фирма «Микран» (RU)

Авторы: Демина Анна Андреевна (RU), Сабанова Ирина Олеговна (RU), Кузьменко Иван Юрьевич (RU), Пономарёв Олег Геннадьевич (RU), Кокин Дмитрий Сергеевич (RU), Жаринов Вячеслав Федорович (RU), Мохаммад Асаф (SY)



Дата поступления **18 ноября 2021 г.** Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **24 ноября 2021** г.

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

1 ellere

Г.П. Ивлиев

POCCHINCKARI (DELLEPAILIER



POCCHINCKASI CHEMINISI



路路路路路

斑

斑

按按按按按按按按按按按按按按按按按

按按按按按按按按按按按按按按按按按按按按

森森

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612340

Программа формирования сигналов 5G Uplink

Правообладатель: Акционерное общество «Научнопроизводственная фирма «Микран» (RU)

Авторы: Демина Анна Андреевна (RU), Кокин Дмитрий Сергеевич (RU), Жаринов Вячеслав Федорович (RU), Мохаммад Асаф (SY), Сабанова Ирина Олеговна (RU), Кузьменко Иван Юрьевич (RU), Пономарёв Олег Геннадьевич (RU)



盗

斑

磨 斑 招 盗 斑 斑

撥 拹 斑

拹 棗

斑 盗 斑 斑 密

斑 斑

遊

齋 招 棗

斑

斑

嘉 斑

斑

盗 盗 斑 斑

遊 斑

描

斑

斑 斑

斑 斑

描

嶽

斑

Заявка № 2022611486 Дата поступления 04 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации в Ресстре программ для ЭВМ 10 февраля 2022 г.

Руководитель Федеральной службы

по интеллектуальной собственности

BOKOMENT ROUTINCAN STREET PORH Г.П. Ивлисв PERCENTION CONTRACTOR Бладалец Ивлиев Григорий Петрович Динствители- с 24 0, 2021 по 24 12 2022



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Жаринов Вячеслав Федорович Самоцитирование рассчитано для: Название работы: Тип работы: Подразделение:

Жаринов Вячеслав Федорович Магистерская диссертация Жаринов Выпускная квалификационная работа



Структура документа: Модули поиска:

Проверенные разделы: основная часть с.2-5, 7-82, приложение с.87-101

ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование: Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU: Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Лапутенко Андрей Владимирович

ФИО проверяющего

Дата подписи:

13-06-2023

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.