

На правах рукописи

Хан Рабиа

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА (NOMA)
ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" на отделении информационных технологий инженерной школы информационных технологий и робототехники.

Научный руководитель: Ph. D. (UCD),
Джаякоди Арачшиладж Душанта Налин Кумара

Официальные
оппоненты: **Кучерявый Евгений Андреевич**,
доктор технических наук, доцент,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Департамент
электронной инженерии Московского института
электроники и математики им. А. Н. Тихонова,
профессор

Покаместов Дмитрий Алексеевич,
кандидат технических наук,
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, кафедра
телекоммуникаций и основ радиотехники,
доцент кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы", г. Москва

Защита состоится 21 февраля 2024 года в 15.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

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

Автореферат разослан 21 декабря 2023 года.

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

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Беспроводная связь возникла в 1865 году и с тех пор постоянно совершенствовалась. В процессе развития технология прошла путь от 1G до 4G и продолжает развитие в настоящее время, оказывая все большее влияние на реальную жизнь. Существующая связь поколения 3G и 4G сталкивается с множеством технических проблем, таких как безопасность, ограниченная пропускная способность, задержка передачи сигнала, чрезмерно высокое энергопотребление и т. д. Новейшие технологии открывают ранее недоступные перспективы и горизонты и вместе с тем приводят к снижению вычислительной сложности и другим недостаткам, таким как: отсутствию безопасности и конфиденциальности.

Неортогональный множественный доступ (*NOMA*) является одной из инноваций, способных в перспективе обеспечить работу беспроводной связи 5-го и последующего поколений (5G и *B5G*). Для обеспечения системы связи в существующих системах используется разделение естественного доступного спектра, что на данный момент привело к исчерпанию большей части спектра. *NOMA* не требуется разделять спектр для предоставления связи пользователям и выполнения других системных требований, он может эффективно использовать выход спектра для выполнения всех современных требований связи наряду с Интернетом вещей (*IoT*), *BigData* и тактильным Интернетом. Эта эффективная система использует множество различных механизмов преодоления разрыва в разделении спектра, что позволяет предоставлять услуги связи более высокого качества. Использование *NOMA* обеспечивает лучшую секретность и конфиденциальность, высокую скорость передачи данных, пропускную способность, энергоэффективность, спектральную эффективность, равную доступность связи для пользователей (системную справедливость), снижает вероятность простоя, задержку, число ошибок на бит (*BER*) и т. д. *NOMA* может быть интегрирован с любым из ныне существующих алгоритмов системы выхода. Наряду с эффективной стороной, *NOMA* сталкивается с определенными ограничениями, которые требуют внимания, в первую очередь с большим числом помех. Это приводит к определенным недостаткам, включая сложность системы, проблемы с обеспечением безопасности и конфиденциальности.

Перед передачей *NOMA* не разделяет сигналы пользователей по частоте и времени, используя *FDMA* (*Frequency Division Multiple Access* — множественный доступ с разделением каналов по частоте) и *TDMA* (*Time Division Multiple Access* — многократный доступ с временным разделением). Чтобы дифференцировать пользователей, *NOMA* выделяет различное количество мощности для разных пользователей, что повышает уровень помех и проблемы безопасности между сигналами. Каждый пользователь получает комбинированный сигнал сообщения с помехами от сигналов всех других пользователей. Следовательно, каждый

пользователь должен выполнить *SIC* (Successive Interference Cancellation — последовательное подавление помех) для сигналов всех других пользователей. Большое количество помех со стороны пользователей увеличивает вычислительную сложность *SIC* по мере увеличения количества мешающих сигналов. Эта диссертация посвящена обеспечению решения проблем *NOMA*.

Степень разработанности темы. В области Интернета Вещей (*IoT*) и неортогонального множественного доступа (*NOMA*), сетей связи пятого и последующих поколений существует достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых: В.В.Бутенко, Б.С. Гольдштейна, В.М. Вишневого, В.Г. Карташевского, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, А.Е. Кучерявого, В.К.Сарьяна, М.А. Сиверса, А.В. Рослякова, А.Е. Рыжкова, С.Н.Степанова,, В.О. Тихвинского, Ю.В.Гайдамаки, Р.В.Киричка, Е.А. Кучерявого, Д.А.Молчанова, А.С.А. Мутханни, Т. Rappoport, D. C. Liang, H. S. Ali, Z. Ding, M. Dohler, C. Toker, F. Baccelli, S. Singh, S. Rangan и других.

Отмеченные выше работы внесли решающий вклад в исследования *NOMA* и других сетей беспроводной связи пятого и последующих поколений. Технические характеристики *NOMA* могут быть дополнительно улучшены путем системного анализа с использованием математических и интеллектуальных инструментов, таких как оптимизация Лагранжа и машинное обучение (*ML*), наряду с использованием подходящих алгоритмов и сценариев. Это может не только принести пользу беспроводной связи и социальным медиа, но и обеспечивает решение многих задач в мире *IoT*. Для понимания основной концепции *NOMA* и причин ее несовершенства был проведен литературный обзор. В ходе сбора и изучения информации были отмечены два основных недостатка *NOMA*: вычислительная сложность системы и наличие значимых помех. Добавление некоторой доли ортогональности связи позволяет оптимизировать параметры системы. Оптимизация скорости и качества связи за счет установления оптимального соотношения между ортогональной и неортогональной составляющей и является целью диссертационной работы, которая определяет также ее задачи, объект и предмет.

Объект исследования. Объектом исследования являются Неортогональный множественный доступ (*NOMA*) в системе беспроводной связи пятого и последующих поколений.

Предмет исследования. Алгоритмы для уменьшения помех и сложности системы неортогонального множественного доступа.

Цель работы. Целью этой диссертационной работы является разработка алгоритмов для повышения общей эффективности *NOMA* с учетом помех между сигналами пользователей, вычислительной сложности *SIC* (которая необходима для подавления помех на приемнике), проблем безопасности, энергоэффективности, сбора радиочастотной энергии, достижимой скорости передачи данных и задержки.

Задачи исследования. Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

1. Проанализировать существующий алгоритм *NOMA* и оценить его производительность путем проведения тщательного литературного обзора существующих статей.

2. Разработать алгоритм для улучшения показателей существующего *NOMA* для пользователей, использующих одни каналы связи: защищенности от помех, надежности и эффективности.

3. Использовать разработанный алгоритм разработки системных моделей для внедрения в современную систему *IoT*.

4. Сформулировать математическое выражение для разработанного алгоритма для определения математической достоверности и сравнения с существующими теоретическими моделями.

5. Сформулировать выражения для повышения энергоэффективности и сбора радиочастотной энергии, чтобы определить практическую значимость разработанного алгоритма.

6. Сформулировать и оптимизировать конструкцию системы с помощью метода оптимизации Лагранжа.

7. Использовать алгоритм машинного обучения во время передачи сигнала для автоматической оптимизации параметров в режиме реального времени, за счет чего смоделированная система станет более интеллектуальной.

8. Разработать еще одну модель системы с использованием механизма компонент-форвард для полнодуплексной беспроводной системы связи с целью уменьшения помех в полнодуплексной системе.

9. Использовать генетический алгоритм машинного обучения в разработанном алгоритме с использованием механизма компонент-форвард для интеллектуальной транспортной системы.

10. Имитировать параметры системы для получения результатов работы предлагаемого алгоритма и сравнения его с существующими результатами *NOMA*, оценить полученные результаты.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Новый алгоритм неортогонального множественного доступа *NOMA* (*M-NOMA*) на основе модуляции предназначен для улучшения существующего алгоритма *NOMA*. При передаче сигналов *NOMA* возникает множество помех из-за отсутствия разделения между передаваемыми сигналами *NOMA* по частоте и времени. *M-NOMA* разделяет пользователей, уникально модулируя сигналы сообщений каждого пользователя. В *M-NOMA* источник модулирует половину пользователей квадратурным (*Q*) компонентом, а оставшуюся половину — синфазным (*I*) компонентом созвездия модуляции *QAM*.

Такое разделение сигналов пользователей с помощью *M-NOMA* снижает помехи на 50%.

2. *M-NOMA* снижает вычислительную сложность *SIC* на приемниках сигналов на 50% по сравнению с *NOMA*. Половина от общего количества сигналов пользователей разделяется модуляцией *M-NOMA*, поэтому *SIC* не применяется для сигналов половины пользователей, что снижает вычислительную сложность на приемнике сигналов на 50% по сравнению с *NOMA*. Для дальнейшего снижения сложности вычислений пользователи с мощным сигналом отделены друг от друга. Это снижает вычислительную сложность на 25%. Таким образом, общее сокращение составляет 75%.

3. Алгоритм компонент-форвард (*CF*) предназначен для полнодуплексной беспроводной системы связи. Этот алгоритм уменьшает помехи, вычислительную сложность и проблемы безопасности существующей системы связи *IBFD* (*In-Band Full Duplex* — Внутриполосный полный дуплекс). Алгоритм *CF* направлен на устранение помех в приемнике / ретрансляторе сигнала, который принимает и передает сигналы в одно и то же время и с одинаковой частотой, и, следовательно, наблюдает большое количество помех между принятым и переданным сигналом при использовании совместной связи *DF* (*Decode-and-Forward* — Декодирование и пересылка). С *CF* приемник/ретранслятор получает сигнал от источника в синфазной (*I*) составляющей и перенаправляет его в квадратурной (*Q*) составляющей созвездия *QPSK*. Таким образом, он предотвращает помехи между принимающим и передающим сигналами.

Теоретическая и практическая значимость диссертации. *Теоретическая значимость* диссертационной работы заключается в разработке и исследовании новых алгоритмов для системы связи *NOMA 5G* с учетом проблемы помех и вычислительной сложности. Пользователи *NOMA* не разделены по частоте и времени. Следовательно, принимаемый сигнал содержит много помех от сигналов всех других пользователей. Каждый пользователь должен вычесть помехи от всех других пользователей, прежде чем декодировать требуемый сигнал. При сохранении спектральной эффективности *NOMA* разработаны два алгоритма. Первый алгоритм предназначен для *HD* (полудуплексной) связи, называемой *M-NOMA*. Другой алгоритм предназначен для *IBFD* (внутриполосной полнодуплексной) связи и называется компонент-форвард. Оба алгоритма ориентированы на разделение пользователей для предотвращения помех и сложности вычислений. Разделение создается во время модуляции сигнала, когда половина пользовательских сигналов модулируется синфазной составляющей, а оставшаяся половина — квадратурной составляющей модуляции *QAM*. Алгоритм *M-NOMA* и *CF* обеспечивают значительное уменьшение помех между сигналами и вычислительной сложности, необходимой для *SIC*. Наряду с основными целями, оба алгоритма также повышают общую эффективность *NOMA* за счет улучшения *SER*, безопасности, скорости передачи данных и задержки.

Практическая значимость этой диссертационной работы заключается во внедрении разработанных алгоритмов с целью улучшения существующих технологий NOMA в рамках развития интеллектуальной транспортной системы (Intelligent Transportation System, ITS) и международные коммуникационные системы (Intelligent Mobile Telecommunication, IMT) в Российской Федерации. При разработке представленных в работе алгоритмов учитывалась возможность возникновения затухания Рэля в окружении. Для всех типов коммуникаций "источник-приемник" также были учтены требования 3GPP, вариативность размеров строений и препятствий на пути сигналов, расстояний, энергий, сложность траекторий, межячеечная и внутриячеечная интерференция. Предлагаемая схема демонстрирует низкий уровень задержки сигнала, высокий уровень безопасности, меньшую вычислительную сложность, меньшую интерференцию и возможность эффективного использования радиочастот.

Результаты, полученные в данной работе, были применены к условиям современных ITS и IMT Российской Федерации. Были получены данные о повышении безопасности трафика, снижении числа инцидентов и дорожных заторов (пробок) за счет обеспечения высокоскоростной, безопасной коммуникации в режиме реального времени. Камеры, датчики, транспортные средства и прочие источники сигнала в режиме реального времени принимают и передают сообщения безопасности в рамках единой сети взаимодействия. Результаты проведенной работы также были включены в курсы, семинары и вебинары Национального Исследовательского Томского Политехнического университета и Технологического Кампуса Шри-Ланки. Название еженедельного вебинара: "Современные беспроводные системы связи". Название научно-исследовательского семинара: "Ежеквартальный исследовательский семинар".

Методы исследования. Методология исследования данной работы использует в качестве инструмента такие подходы, как обзор литературы, системный анализ, системный дизайн, проектирование системы, базовая оптимизация Лагранжа, алгоритм машинного обучения, *IoT*, беспроводная связь (потеря пути, линия видимости, *AWGN*, затухание Рэля, модуляция, *NOMA* и *URLLC*). Для вывода математического выражения использовались следующие математические подходы; линейная алгебра, частичные производные, дифференцирование, интегрирование, функции плотности вероятности и кумулятивные функции распределения Гаусса, экспоненциальные, геометрические распределения и распределения Рэля. Инструменты моделирования включают в себя метод моделирования Монте-Карло, реализация функций в *C*, *Python*, *Matlab* и *Wolfram Mathematica*.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций: 1, 2, 3, 5, 8, 10, 11 и 14.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эта диссертация включает в себя новый алгоритм неортогонального множественного доступа на основе модуляции (*M-NOMA*), чтобы превзойти существующий обычный *NOMA* для повышения общей эффективности системы, в частности на помехи и вычислительную сложность. “Соответствует направлениям исследований 1, 2, 3, 5 и 8 специальности”.

2. Новая *M-NOMA* дополнительно разработан с использованием различных подходов, таких как базовая оптимизация Лагранжа и генетический алгоритм машинного обучения для проверки производительности системы в современном мире с помощью существующего инструмента. “Соответствует исследовательской области 3 специальности”.

3. Для уменьшения помех в связи с *In-Band Full Duplex (IBFD)* предлагается еще один новый алгоритм совместной связи. Вероятность отключения секретности и уравнения пропускной способности получены для проверки системы в современной беспроводной телекоммуникационной системе *5G*. “Соответствует направлениям исследований 5, 8 и 10 специальности”.

4. Новые системные модели предназначены для каждого алгоритма практического развертывания в реальных сценариях электросвязи. “Соответствует исследовательской области 14”.

5. Разработана новая система безопасности с новым алгоритмом совместной связи компонента и вперед для беспроводной телекоммуникационной системы. “Соответствует исследовательской области 10 и 11”.

6. Предлагаемые алгоритмы исследуются для современного Интернета вещей как приложения в Интеллектуальной транспортной системе (*ITS*). Он показывает значительное улучшение, в среднем в 2 раза, с *ITS* и может быть полезным инструментом для будущих сетей электросвязи *5G*. “Соответствует исследовательской области 14”.

Тестирование результатов исследования. Результаты, полученные для этого тезиса, были опубликованы в нескольких научных статьях наряду с сравнением других методов эталона. Физическое обсуждение результатов также проводилось на международных конференциях, в том числе: Международный форум по стратегическим технологиям (*IFOST*), Томск, Российская Федерация, 2019 и в семинарах *IEEE Globecom (GC Wkshps)*, Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты, 2018

Научная работа выполняется в сотрудничестве с *Department of Information Security Engineering, Soonchunhyang University, Южная Корея, Department of Electronics and Communication Engineering, Visversvaraya National Institute of Technology, Индия, Department Ecole de Technology Superieure, University du Quebec, Монреаль, Канада, Faculty of Information Technology, University of Jyaskyla, Финляндия, School of Computer*

Science, University College Dublin, Ирландия and Centre for Wireless Communications, University of Oulu, Финляндия, Department of Computer Science, Swansea University, Суонси, Великобритания и ICS, Home of 5GIC, University of Surrey, Великобритания.

Апробация результатов исследования. Результаты предлагаемого метода представлены, приняты и опубликованы в нескольких международных журналах и конференциях, включая Научный журнал «Информационные Технологии И Телекоммуникации», 2022, *MDPI Electronics, Dec 2020 (Quartile 2), Physical Communication March 2020 (Quartile 3), IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 196-248, *Firstquarter 2020 (Quartile 1, Impact factor 29.83), Wireless Networks. Sensors*, 19(5), 1169, 2019, *International Journal of Engineering & Technology, March 2018, International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Томск, Российская Федерация, 2019 and *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты, 2018.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно, включая написание, редактирование, выводы, моделирование, идеи и новизну. Автор публикует одну статью самостоятельно, а остальные статьи написаны в соавторстве. Соавторы только вычитывают статьи, остальная работа выполняется автором этой диссертации.

Объем и структура работы. Диссертационная работа содержит 191 страницу, 91 рисунок, 6 таблиц, 7 приложений, список литературы состоит из 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении доказана актуальность темы диссертации, представлены цель и задачи диссертационной работы, научная новизна результатов диссертации, их теоретическая и практическая ценность, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях и семинарах, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор основ, научной и технической информации об основных беспроводных коммуникациях, модуляции и безопасности.

Вторая глава фокусируется на основах *NOMA* и литературе, где содержатся данные о его практической значимости. Детали включают теоретическое и научное значение существующих *NOMA* с точки зрения интеграции в современную беспроводную систему связи и характеристики *NOMA*, благодаря которым он превосходит существующую систему связи.

Третья глава включает подробную информацию о предлагаемых *M-NOMA* и различных системных моделях, методологиях и используемом математическом аппарате в соответствии с данными системных моделей.

Алгоритм NOMA на основе модуляции (*M-NOMA*)

В *M-NOMA* источник модулирует сигналы далеких потребителей по квадратурной составляющей и вблизи сигналов пользователей о реальном компоненте сигнального созвездия *QPSK*. Это обеспечивает ортогональность (нарезку) между сигналом ближнего и дальнего пользователей. Эта нарезка предотвращает помехи между дальними и ближайшими потребителями. В *M-NOMA* потребители, близкие к источнику сообщения, получают сигналы сообщения без помех, создаваемых сигналом удаленных пользователей. Следовательно, они должны применять технологию последовательного подавления помех (*Successive Interference Cancellation, SIC*) только для вычитания сигналов сообщений ближайших пользователей для $g_n > g$. Таким образом, близкие и удаленные пользователи применяют *SIC* только в пределах одного кластера ближайших или удаленных пользователей. Для сравнения, близкие потребители в *M-NOMA* выполняют в $N/2$ раза меньше *SIC*, чем *NOMA*, но более удаленные пользователи выполняют такое же количество *SICs*. В этом документе кратко описывается одна из предлагаемых системных моделей, приведенная ниже.

Системная модель

Мы рассматриваем сценарий *DL M-NOMA ITS*, как у данного в Рисунок 1. В рассмотренном сценарии система безопасности (*SS*) через дорогу посылает сигналы различным транспортным средствам для предотвращения серьезного дорожно-транспортного происшествия. Для *M-NOMA* имеем $N = \{1, \dots, k/2, \dots, k\}$ транспортных средств / потребителей. Транспортные средства разделены расстоянием d_i *SS*. 2. Расстояние до каждого транспортного средства было выбрано в порядке возрастания, например, $d_n, \dots, d_4 > d_3 > d_2 > d_1$. Есть два кластера, каждый из которых включает половину потребителей: ближайший кластер (ближе к системе безопасности) несет вблизи $N/2$ пользователей, удаленный кластер содержит $N/2$ пользователей, соответственно.

Одна и та же модель может быть реализована в различных сценариях, таких как:

1. Автомобиль посылает прямые сигналы связи всем четырем транспортным средствам, движущимся в его направлении по четырем различным дорогам, чтобы предотвратить аварию с ребенком, переходящим дорогу.

2. Декодирование вперед-кооперативный механизм (*Decode Forward Cooperative Communication, CM-NOMA*). Каждый пользователь определенного кластера помогает более удаленному пользователю в том же кластере, расшифровывая его сигнал, полученный от источника, и транслируя его дальше.



Рисунок 1 – URLLC-адаптированная модель системы ITS M-NOMA для борьбы с авариями

Прямая связь

В *DL M-NOMA* источник передает сигнал с суперпозиционным кодом (*superposition coding, SC*). В *SC* источник выделяет каждому потребителю разные уровни мощности.

Каждый потребитель получает суперпозиционный сигнал, включающий сигналы сообщений других потребителей. Полученная мощность каждого пользователя затухает из-за потери пути. Это зависит от передаваемой мощности для всех пользователей и расстояния до предполагаемых пользователей. Общая полученная мощность каждого пользователя в V_n^{th} может быть представлена в следующем виде:

$$P_{RM_n}(t) = K_n \left(\frac{d_0}{d_n} \right)^\gamma \sqrt{P_T}. \quad (1)$$

Общий суперпозиционный сигнал N потребителей после индивидуального распределения мощности приведен ниже:

$$x_{V_N}(t) = P_{RM_n}(t) \left(\sum_{I=1}^{\frac{k}{2}} \sqrt{\alpha_I} x_I(t) + \sum_{Q=\frac{k}{2}+1}^k \sqrt{\alpha_Q} x_Q \hat{i}(t) \right). \quad (2)$$

В вышеуказанных уравнениях α – коэффициент мощности. Он может быть представлен как:

$$\alpha = \sum_{l=1}^{\frac{k}{2}} \sqrt{\alpha_l} + \sum_{q=\frac{k}{2}+1}^k \sqrt{\alpha_q}. \quad (3)$$

Общий полученный сигнал V_n^{th} пользователем может быть представлен как:

$$\alpha u_{M_n}(t) = P_{RV_n}(t) x_{V_n} \sqrt{g_n} + w(t), \quad (4)$$

где g_n – канал усиления и $w(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум (AWGN) с нулевым средним и дисперсии σ^2 .

Вычисление соотношения сигнала к сумме помех и шума

Когда источник передает сигналы только для двух пользователей, тогда в идеале нет интер-пользовательского вмешательства в M -NOMA, так как сигналы каждого пользователя передаются при разном реальном или квадратурном компоненте модуляции $QPSK$. Тем не менее, когда число пользователей увеличивается, удаленный пользователь сталкивается с помехами, вызываемыми сигналами других удаленных пользователей в том же кластере. В M -NOMA помеха в 2 раза меньше, чем в обычном NOMA, для каждого кластера.

В рассмотренном сценарии источник передает суперпозиционные сигналы сообщения всем пользователям. Источник суммирует сигналы более удаленных пользователей (по принципу суперпозиции) на квадратурном компоненте сигнального созвездия $QPSK$ и вблизи сигнала пользователей о реальном компоненте. Ближайшие пользователи выполняют SIC; следовательно, в идеале нет никаких помех при расшифровке сигнала. В связи с тем, что источник передает только сигнал удаленных пользователей на воображаемом компоненте, более удаленный пользователь расшифровывает свое сообщение после SIC только с сигналами более удаленного пользователя в M -NOMA, где $g_n > g_{n+1}$. Та же процедура полезна для обобщения аналитических выражений любых других методов модуляции.

Отношение сигнала к сумме помех и коэффициента шума (SINR) без SIC для V_n^{th} пользователя в NOMA может быть представлен как:

$$\zeta_n = \frac{\alpha_n P_T K_n d_0^\gamma d_n^{-\gamma} g_n}{(\alpha - \alpha_n) P_T K_n d_0^\gamma d_n^{-\gamma} g_n + \sigma^2}. \quad (5)$$

Это показывает, что в NOMA каждый пользователь сталкивается с помехами, обусловленными сигналами всех других пользователей.

SINR с SIC пользователя V_n^{th} M -NOMA в кластере 1 имеет вид:

$$\zeta_{V_n} = \frac{\alpha_n P_T K_n d_0^\gamma d_n^{-\gamma} g_n}{\left(\sum_{l=1}^{\frac{k}{2}} \alpha_l - \alpha_n\right) P_T K_n d_0^\gamma d_n^{-\gamma} g_n + \sigma^2}. \quad (6)$$

Аналогичным образом для кластера 2:

$$\zeta_{V_n \hat{t}} = \frac{\alpha_n P_T K_n d_0^\gamma d_n^{-\gamma} g_n}{\left(\sum_{Q=\frac{k}{2}+1}^k \alpha_Q - \alpha_n \right) P_T K_n d_0^\gamma d_n^{-\gamma} g_n + \sigma^2}. \quad (7)$$

Для *M-NOMA* помехи друг другу создают те пользователи, которые находятся на одном компоненте модуляции *QPSK*. Вышеупомянутое выражение может обеспечить индивидуальный *SINR* каждого пользователя.

В математических выражениях (5), (6) и (7) первый термин в знаменателе показывает помехи, наблюдаемые потребителями с другими пользователями. Заметно, что помехи для каждого пользователя в *NOMA* намного больше, чем в *M-NOMA*, так как количество мешающих пользователей и *SIC* меньше из-за созданной нарезки. Таким образом, сравнительно вычислительная сложность *NOMA* больше, чем *M-NOMA*.

Вычисление достижимой скорости передачи данных (Achievable Data Rate)

Достижимая скорость передачи данных каждого пользователя зависит от его *SINR*. На основе вышеуказанных вычислений *SINR* скорости передачи данных по *NOMA* и *M-NOMA* даются как:

$$R_n = \log_2(1 + \zeta_n), \quad (8)$$

и

$$R_{V_n} = \log_2(1 + \zeta_{Mn}). \quad (9)$$

Следует отметить, что достижимая скорость передачи данных прямо пропорциональна *SINR*. Для *M-NOMA* *SINR* выше по сравнению с *NOMA*. Таким образом, достижимая скорость передачи данных для *M-NOMA* лучше, чем для *NOMA*. Скорость передачи данных или пропускная способность также непосредственно связаны с задержкой системы, т.е. более высокая достижимая скорость передачи данных соответствует меньшей задержке передачи. Таким образом, *M-NOMA* предлагает меньшую задержку и большую скорость передачи данных по сравнению с *NOMA*.

DF Кооперативная связь

Во втором сценарии рассматривается возможность кооперативного механизма связи для обоих кластеров. Кластер 1 содержит транспортные средства с лучшей *SNR* по отношению к кластеру 2. Если рассматривать четырех пользователей, V_1 является ближайшим пользователем в кластере 1, а V_3 является ближайшим пользователем в кластере 2 по отношению к источнику. В *M-NOMA* источник кодирует пользователей кластера 1 в реальном компоненте и сигнал дальнего пользователя в квадратурном компоненте сигнального созвездия *QPSK*. Мы предполагаем, что каждый пользователь уже знает, находится ли его сообщение в реальном или в квадратурном компоненте. В кластере 1 пользователь V_1 получает сигнал от всех остальных пользователей во временном промежутке 1 с помощью *M-NOMA*, он расшифровывает все сигналы реального компонента и выполняет *SIC*, чтобы получить свой собственный сигнал.

После расшифровки сигнала от V_2 он направляет сигнал на V_2 во временном промежутке 2 с использованием традиционных DF. Поэтому V_2 получает два сигнала, один от источника, а другой от V_1 . Полученный сигнал от источника к V_1 и V_2 может быть представлен как:

$$r_{SR}(t) = x_{V_N} \sqrt{g_1} K_1 \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^\gamma + w(t), \quad (10)$$

и

$$r_{SD}(t) = x_{V_N} \sqrt{g_2} K_2 \left(\frac{d_0}{d_2} \right)^\gamma + w(t). \quad (11)$$

Полученный сигнал от V_1 к V_2 имеет следующий вид:

$$r_{RD}(t) = x_{V_2} \sqrt{\hat{P}_T} \sqrt{g_{12}} K_{12} \left(\frac{d_0}{d_{12}} \right)^\gamma + w(t). \quad (12)$$

Пользователь V_2 сочетает в себе оба сигнала через *MRC* и расшифровывает сигнал. Аналогичным образом, в кластере 2 V_3 получает сигнал пользователя V_4 вместе со своим собственным сигналом. Он также расшифровывает и перенаправляет сигнал V_4 . Общее полученное отношение сигнала к шуму V_2 при этом имеет вид:

$$\zeta_D = \frac{P_T \alpha_2 g_2 K_2 d_0^\gamma d_2^{-\gamma} + \hat{P}_T g_{12} K_{12} d_0^\gamma d_{12}^{-\gamma}}{\alpha_2 P_T K_2 d_0^\gamma d_2^{-\gamma} g_2 + \sigma^2}. \quad (13)$$

В вышеуказанных уравнениях g_{12} – коэффициент канала, d_{12} – расстояние между V_1 and V_2 . Скорость передачи данных для связи DF также может быть вычислена с помощью (9) и (12).

Четвертая глава включает результаты моделирования заранее определенных системных моделей главы 3.

Численные значения для моделирования

Мы обсуждаем оценку аналитических результатов с смоделированными результатами для *M-NOMA*. Мы использовали *NOMA* в качестве базовой системы. В Таблица 1 показаны детали параметров, используемых для моделирования. Для обеих систем использовались одинаковые исходные параметры. Для обоих методов мы использовали модуляцию *QPSK*, однако для *M-NOMA* сигналы ближайших пользователей моделировались на реальных компонентах, а сигналы более удаленных пользователей - на квадратурном компоненте сигнального созвездия *QPSK*.

Важным параметром системы, который определяет надежность системы, является частота ошибок в символах (*SER*). Система с лучшей *SER* и надежностью является основным требованием для системы *URLLC*. Мы моделируем *SER* для аналитического выражения для канала *AWGN*, рассматривая случай наличия у системы только двух пользователей. Рисунок 1 показывает, что с точки зрения *SER* в канале *AWGN M-NOMA* работает лучше, чем *NOMA*. Заметно: аналитическое выражение совпадает с результатами моделирования Монте-Карло для *M-NOMA*.

Таблица 1 – показывает детали параметров, используемых для моделирования

Параметр	Численное Значение	Параметр	Численное Значение	Параметр	Численное Значение
d_1	0.2 m	d_2	0.4 m	d_3	0.8 m
d_4	1 m	γ_1	2	γ_2	2.2
γ_3	2.8	γ_4	3	α_{R1}^*	0.3
α_{R2}^*	0.7	α_{f1}^*	0.25	α_{f2}^*	0.75
α_{w1}^*	0.108	α_{w2}^*	0.135	α_{w3}^*	0.274
α_{w4}^*	0.481	P_T	1 W	Итерации	10^6

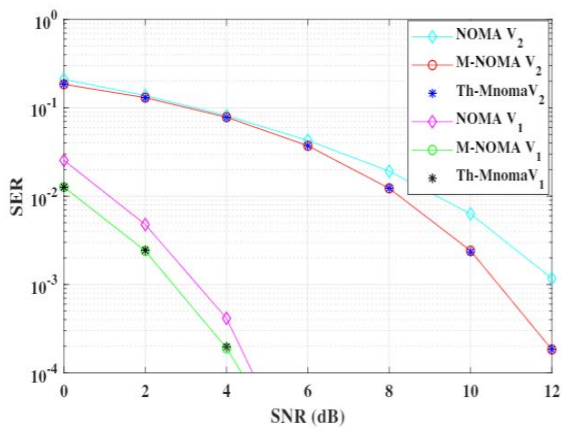


Рисунок 1 – Частота ошибок в символах для двух пользователей в канале AWGN с NOMA, M-NOMA и теоретической M-NOMA

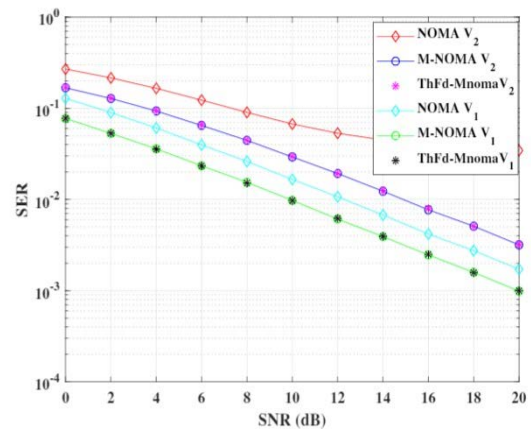


Рисунок 2 – Частота ошибок в символах для двух пользователей в плоском замирающем канале Рэля с NOMA, M-NOMA и теоретическим M-NOMA

Мы моделируем частоту ошибок в символах для аналитического выражения для плоского замирания канала, рассматривая случай наличия у системы только двух пользователей. Тем не менее, с тем же выражением можно построить диаграмму для нескольких пользователей. Рисунок 2 показывает, что с точки зрения SER в плоском замирающем канале $M-NOMA$ работает лучше, чем $NOMA$. Заметно; аналитическое выражение совпадает с результатами моделирования Монте-Карло для $M-NOMA$.

Мы моделируем частоту ошибок в символах для оптимизированного распределения мощности аналитического выражения. Оптимизация мощности сводит к минимуму SER для канала AWGN. Для моделирования мы рассмотрим четырех пользователей с каналом AWGN. Рисунок 3 показывает, что с точки зрения SER в канале AWGN с минимальными SER с максимальными коэффициентами мощности оптимизированная $M-NOMA$ работает лучше, чем $M-NOMA$.

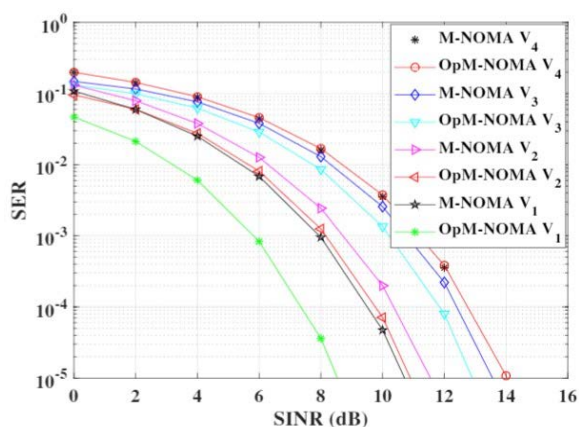


Рисунок 3 – Частота ошибок в символах для четырех пользователей в канале *AWGN* с оптимизацией и без оптимизации для *M-NOMA*

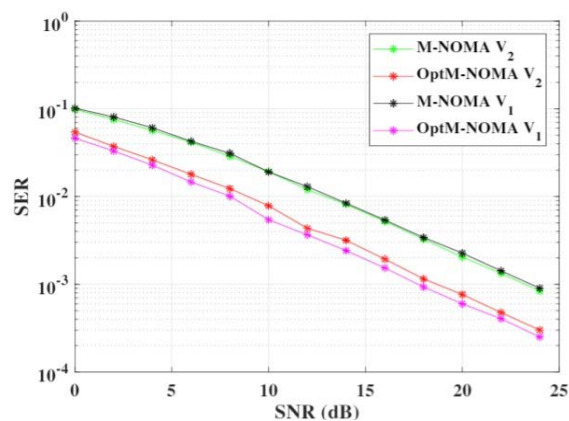


Рисунок 4 – Частота ошибок в символах для двух пользователей в плоском замирающем канале с оптимизацией *M-NOMA* и без нее

Мы моделируем частоту ошибок в символах для оптимизированного распределения мощности аналитического выражения, данного в предыдущей главе. Оптимизация мощности сводит к минимуму *SER* для плоского замирования канала. Для моделирования мы рассматриваем двух пользователей с плоским замированием канала. Рисунок 4 показывает, что оптимизированная *M-NOMA* работает лучше, чем *M-NOMA*, с точки зрения *SER* в плоском замирающем канале с минимизацией *SER* и максимальными коэффициентами мощности. Следует отметить, что для низкого *SNR* в *NOMA* *SER* более удаленного пользователя лучше, чем у пользователя рядом с источником. Тем не менее, *M-NOMA* для ближних пользователей работает лучше, чем для более удаленных. Это связано с тем, что ближние пользователи не страдают от помех от сигналов высокой мощности более удаленных пользователей, так как они модулируются на отдельных компонентах (реальных и квадратурных) во время модуляции.

Мы моделируем частоту ошибок символа для совместной связи *Decode* и *Forward* (*DF*) для *NOMA* и *M-NOMA*. Мы не рассчитываем мощность оптимизации для связи *DF*. Тем не менее, мы используем рассчитанные оптимизированные значения коэффициентов мощности четырех пользователей канала *AWGN*. Для моделирования мы рассматриваем четырех пользователей с плоским каналом замирования. Мы считаем, что пользователи V_1 и V_2 находятся в кластере 1, а V_3 и V_4 находятся в кластере 2. V_1 помогает V_2 , передавая свой расшифрованный сигнал V_2 *DF*-методом, в результате чего V_2 получает сравнительно лучший сигнал. Аналогичным образом V_3 помогает V_4 . Рисунок 5 показывает, что *M-NOMA* работает лучше, чем *NOMA*, с точки зрения *SER*. Вышеупомянутая дискуссия показывает, что *M-NOMA* имеет лучший общий *SER*. Таким образом, *M-NOMA* является надежной системой, которая подходит для системы *URLLC*.

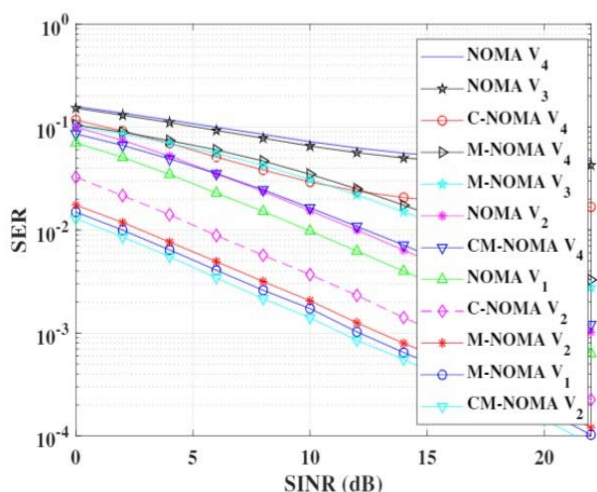


Рисунок 5 – Частота ошибок в символах для четырех пользователей DF совместной связи в плоском затухающем канале для $M-NOMA$ и $NOMA$

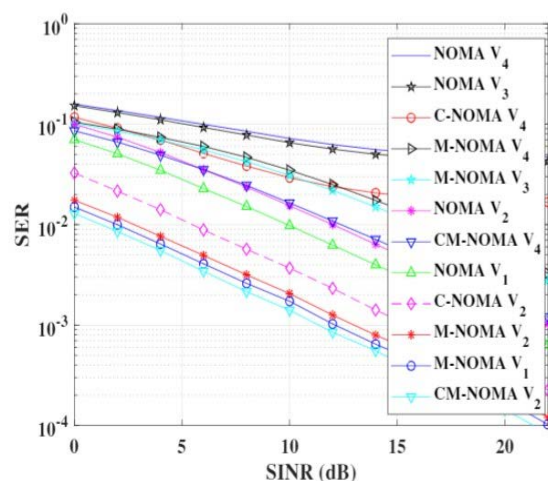


Рисунок 6 – Частота ошибок в символах для четырех пользователей DF совместной связи в плоском замирающем канале для $M-NOMA$ и $NOMA$

Мы моделируем частоту ошибок в символах для совместной связи *Decode* и *Forward (DF)* для $NOMA$ и $M-NOMA$. Мы не рассчитываем мощность оптимизации для связи DF . Тем не менее, мы используем рассчитанные оптимизированные значения коэффициентов мощности четырех пользователей канала $AWGN$. Для моделирования мы рассматриваем четырех пользователей с плоским каналом замирания. Мы считаем, что пользователи V_1 и V_2 находятся в кластере 1, а V_3 и V_4 находятся в кластере 2. V_1 помогает V_2 , передавая свой расшифрованный сигнал V_2 DF -методом, в результате чего V_2 получает сравнительно лучший сигнал. Аналогичным образом V_3 помогает V_4 . Рисунок 6 показывает, что $M-NOMA$ работает лучше, чем $NOMA$, с точки зрения SER . Вышеупомянутая дискуссия показывает, что $M-NOMA$ имеет лучший общий SER . Таким образом, $M-NOMA$ является надежной системой, которая подходит для системы $URLLC$.

Мы моделируем пропускную способность системы по сравнению с количеством переданных битов. Для моделирования мы рассматриваем четырех пользователей с плоским каналом замирания. Рисунок 7 показывает, что пропускная способность уменьшается с увеличением числа переданных битов данных. Все пользователи $M-NOMA$ показывает лучшую пропускную способность, чем $NOMA$.

Рисунок 8, демонстрирует сравнение уровня помех, с которыми сталкивается каждый пользователь в системе $NOMA$ и $M-NOMA$. Можно заметить, что каждый пользователь $M-NOMA$ сталкивается с меньшими помехами по сравнению с пользователями $NOMA$. Это показывает, что предлагаемая схема является набором простых, но значительных улучшений с точки зрения производительности системного уровня.

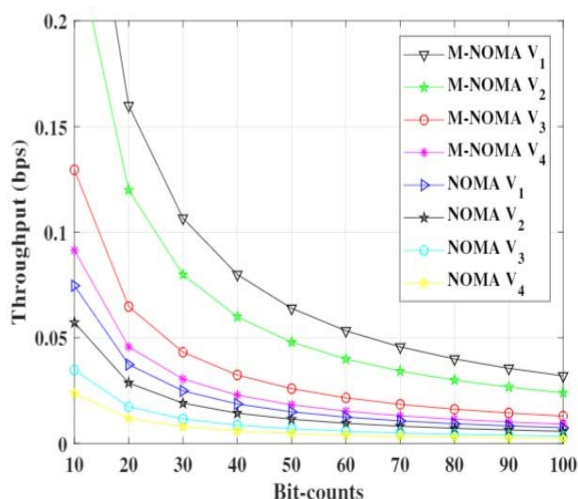


Рисунок 7 – Пропускная способность для четырех пользователей в плоском замирающем канале для *NOMA* и *M-NOMA*

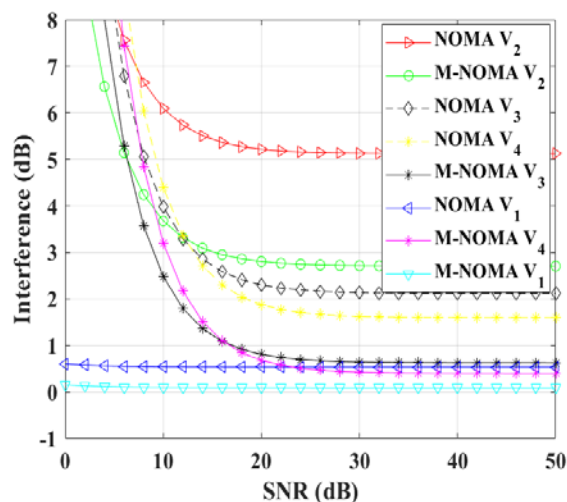


Рисунок 8 – Сравнение помех для пользователей *NOMA* и *M-NOMA*. По рисунку видно, что *M-NOMA* более эффективен, чем *NOMA*, с точки зрения помех

В описании ниже приведены результаты моделирования системы с и без *MLGA*. Мы используем *NOMA* в качестве эталонного метода. Результаты моделирования показывают сравнение МЕЖДУ *NOMA* и *BEEM-NOMA* с и без использования *MLGA*. Были проанализированы зависимости от точки к точке и кооперативный механизм связи *DF*.

Для моделирования был использован плоский замирающий канал Рэля, 10^5 итераций, канал с частотой (BW) = 1 Hz, экспонента потери пути (γ) = 4, общая мощность передачи источника составляет $T_p = 1W$, коэффициент распределения мощности выбирается за счет оптимизации *MLGA*. Тем не менее, мы ограничили значение в соответствии с основным требованием системы *NOMA*: $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$. Использовать *MLGA* для оптимизации параметров системы чрезвычайно удобно и менее сложно. Кроме того, использование генетического алгоритма улучшает картину в целом и позволяет вычислять требуемые параметры с учетом всех переменных и констант.

Результат моделирования в Рисунок 9 показывает связь между общей *EE* системы и соотношением между сигналом и суммой помех и шума. Для моделирования мы использовали *MLGA* с четырьмя пользователями в ячейке. Тем не менее, *EE* может быть рассчитана и для N пользователей. Результаты моделирования ясно показывают, что *BEEM-NOMA* более эффективен, чем *NOMA*. В среднем, *EE BEEM-NOMA* в два раза больше, чем у *NOMA*.

Результат моделирования на Рисунок 10 показывает *RFEN* в отношении *RFEN EE*. На рисунке представлено сравнение между *GLMA BEEM-NOMA*, *GLMA-NOMA*, *BEEM-NOMA* и *NOMA*. Из результатов видно, что *BEEM-NOMA* собирает больше энергии, чем

NOMA с *MLGA* и без нее. Также рисунок доказывает, что *RFEH* может составлять от 0,1 до 0,9 *EE* в зависимости от атмосферного состояния, канала и прибора.

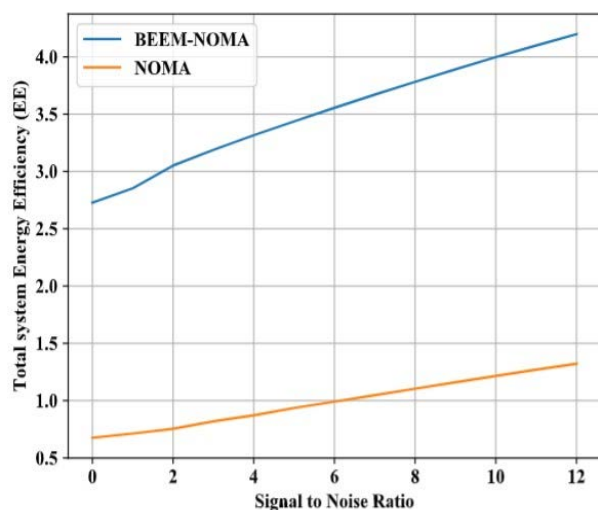


Рисунок 9 – Результаты моделирования для *MLGA* с *NOMA* и *BEEM-NOMA*.

Мы использовали пользователей $K=4$, модуляцию *QPSK* по плоским замирающим каналам Рэля

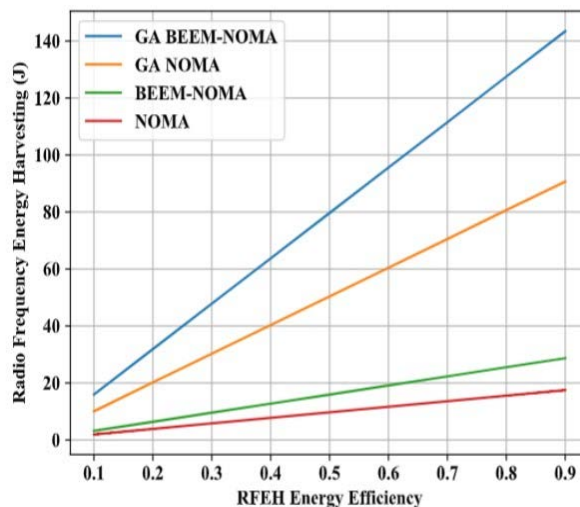


Рисунок 10 – Результаты моделирования производительности *RFEH* с использованием *NOMA* и *BEEM-NOMA* с *MLGA* и без нее. Мы использовали пользователей $K=4$, модуляцию *QPSK* по плоским замирающим каналам Рэля

Пятая глава затрагивает области применения *M-NOMA* в современной связи *5G* и за ее пределами (новейшие технологии). Также подводятся итоги проделанной работы и приводится заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ существующих беспроводных технологий *5G*. Технологии, которые используются для преодоления требований высокой передачи данных современной системы связи с использованием того же электромагнитного спектра. Электромагнитный спектр - это природный ресурс, и большая его часть уже исчерпана. Существует несколько новых технологий, которые, как утверждается, преодолевают этот недостаток существующих технологий, включая микроволновую передачу, *IBFD* (внутриполосную полнодуплексную связь) и *NOMA*. *NOMA* является одной из многообещающих технологий, поскольку она направлена на повторное использование всего спектра без разделения спектра между пользователями и обеспечение большей спектральной эффективности.

2. В существующих технологиях, таких как *OFDMA*, сигналы пользователей разделяются с использованием частоты или времени, или и того, и другого. Технологии

NOMA являются особенно привлекательными вследствие высокой спектральной эффективности, которая может быть достигнута путем устранения ортогональности, используемой существующими технологиями для разделения доступного спектра с целью предотвращения помех. Однако полное устранение ортогональности также вызывает помехи, которые могут быть удалены с использованием *SIC*, выполняемых на приемнике в *NOMA*. Количество *SIC* увеличивает вычислительную сложность обычной системы *NOMA*.

3. В целях улучшения спектральной эффективности *NOMA* в этом тезисе были предложены два алгоритма для уменьшения сложности вычислений помех и приемников:

- *M-NOMA* для полудуплексной связи и
- Внутриполосная полнодуплексная связь с *CF* (*Component-Forward* — компонент-форвард).

4. Мы предложили новую технику под названием *M-NOMA*. В *M-NOMA* мы попытались устранить основные помехи в *UL* и *DL NOMA*, введя ортогональность в стадии подготовки сигнала вместо включения ее в спектр. Было показано, что предлагаемый метод эффективен для снижения *SER*, вычислительной сложности, помех и улучшения скорости передачи данных для системы пользователей по сравнению с обычным *NOMA*.

5. Ортогональное модулирование пользователей в *M-NOMA* приводит к сравнительно меньшему числу помех и меньшим сложностям в передаче сигнала. Снижение требований *SIC* в конце приемника из-за минимальных помех делает систему менее сложной. Сформулированный протокол является эффективным и простым решением для преодоления определенных недостатков и улучшения системного отклика. В *M-NOMA* источник модулирует половину пользователей квадратурным (*Q*) компонентом, а оставшуюся половину — синфазным (*I*) компонентом созвездия модуляции *QAM*. Такое разделение сигналов пользователей с помощью *M-NOMA* снижает помехи на 50%. Половина от общего количества сигналов пользователей разделяется модуляцией *M-NOMA*, поэтому *SIC* не нужен для удаления сигналов половины пользователей, что снижает вычислительную сложность на приемнике сигналов на 50% по сравнению с *NOMA*.

6. *M-NOMA* изменяет модуляцию системы, которая изменяет *SER* системы. Таким образом, уравнения *SER 4-QAM* получены для канала *AWGN* и канала плоского затухания Рэля. Обычные уравнения *4-QAM* для канала *AWGN* и канала плоского затухания Рэля сравниваются с полученными уравнениями для *M-NOMA*. Замечено, что *M-NOMA* теоретически уменьшает *SER* канала *AWGN* и канала плоского затухания Рэля наполовину ($1/2$). Для проверки правильности уравнений *SER M-NOMA* проводится сравнение как для теоретической, так и для моделируемой версии *SER* уравнений *M-NOMA*. В результате наблюдается, что как теоретические, так и

смоделированные выходные данные SER согласуются друг с другом. Следовательно, делается вывод, что $M-NOMA$ уменьшает теоретическую и моделируемую SER наполовину ($1/2$) по сравнению с обычной модуляцией.

7. Для дальнейшего улучшения $M-NOMA$ используется оптимизация Лагранжа для варианта использования ITS . Оптимизация Лагранжа используется для оптимизации SER и $Data Rate$ для канала $AWGN$ и канала плоского затухания Рэля. Для постановки задач коэффициенты распределения мощности рассматриваются как ограничения. Решения для ограничения используются в моделировании для оптимизации SER и скорости передачи данных связи, участвующей в ITS .

8. $3GPP$ (Партнерская программа 3-го поколения) установила значения системных параметров для системы связи $5G$. Теоретически и практически значения все еще нуждаются в улучшении, а значения все еще очень далеки от заданных параметров. Он требует максимальной скорости передачи данных до 20 Гбит/с, задержки в радиосети 1 мс и пропускной способности 10 Мбит/с/м². В этой диссертации мы улучшили существующие значения $NOMA$, используя $M-NOMA$.

9. Результаты моделирования этой диссертации показывают, что $M-NOMA$ улучшает следующие параметры в среднем и приблизительно по сравнению с $NOMA$. Некоторые из полученных результатов приведены ниже.

- Два пользователя с одним источником передачи и восходящей связью (канал $AWGN$):

Для близкого пользователя SER для $M-NOMA$ на 37% меньше, чем для $NOMA$, для удаленного пользователя SER для $M-NOMA$ на 10% меньше, чем для $NOMA$, для пользователя near скорость передачи данных для $M-NOMA$ на 45% выше, чем для $NOMA$.

- Два пользователя с одной передающей станцией и нисходящей линией связи (DL) (канал $AWGN$):

Для пользователя near SER для $M-NOMA$ на 8% меньше, чем $NOMA$, для удаленного пользователя SER для $M-NOMA$ на 5% меньше, чем $NOMA$.

- Четыре пользователя с одним источником передачи, связь $4-QAM$ и DL (канал Рэля с плоским затуханием):

Для ближайшего пользователя 1 ($M3$) SER для $M-NOMA$ на 18% меньше, чем $NOMA$,

для ближайшего пользователя 2 ($M4$) SER $M-NOMA$ на 10% меньше, чем $NOMA$,

для удаленного пользователя 3 ($M2$) SER $M-NOMA$ на 21% меньше, чем $NOMA$,

для удаленного пользователя 4 ($M1$) SER $M-NOMA$ на 20% меньше, чем $NOMA$,

для ближайшего пользователя 2 ($M4$) SER $M-NOMA$ с DF на 12% меньше $NOMA$,

для удаленного пользователя 4 ($M1$) SER $M-NOMA$ с DF на 25% меньше, чем у $NOMA$,

для ближайшего пользователя 1 ($M3$) скорость передачи данных M -NOMA на 25% выше, чем NOMA,

для ближайшего пользователя 2 ($M4$) скорость передачи данных M -NOMA на 35% выше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 3 ($M2$) скорость передачи данных M -NOMA на 95% выше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 4 ($M1$) скорость передачи данных M -NOMA на 90% выше, чем NOMA,

для ближайшего пользователя 1 ($M3$) помехи M -NOMA на 50% меньше, чем NOMA,

для ближнего пользователя 2 ($M4$) помехи M -NOMA на 60% меньше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 3 ($M2$) помехи M -NOMA на 30% меньше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 4 ($M1$) помехи M -NOMA на 75% меньше, чем NOMA.

- Применение M -NOMA в интеллектуальной транспортной системе (ITS) с созвездием 16-QAM:

- Оптимизация Лагранжа для четырех транспортных средств M -NOMA с каналом AWGN:

Для ближайшего пользователя 1 ($V1$) SER для оптимизированного M -NOMA на 10% меньше, чем M -NOMA,

для near user 2 ($V2$) SER для оптимизированного M -NOMA на 4% меньше, чем M -NOMA,

для удаленного пользователя 3 ($V3$) SER для оптимизированного M -NOMA на 2% меньше, чем M -NOMA,

для удаленного пользователя 4 ($V4$) SER для оптимизированного M -NOMA такой же, как и для M -NOMA.

- Оптимизация Лагранжа для двух транспортных средств M -NOMA с каналом плоского затухания Рэля:

Для ближайшего пользователя 1 ($V1$) SER для оптимизированного M -NOMA на 9% меньше, чем M -NOMA,

для удаленного пользователя 2 ($V2$) SER для оптимизированного M -NOMA на 9% меньше, чем M -NOMA,

для пользователя near user 1 ($V1$) скорость передачи данных для оптимизированного M -NOMA на 4% выше, чем для M -NOMA,

для удаленного пользователя 2 ($V2$) скорость передачи данных для оптимизированного M -NOMA на 1% выше, чем для M -NOMA,

- Скорость передачи данных (Throughput):

Для ближайшего пользователя 1 ($V1$) скорость передачи данных для M -NOMA на 75% выше, чем для NOMA,

для near user 2 (V_2) скорость передачи данных для M -NOMA на 65% выше, чем для NOMA

для удаленного пользователя 3 (V_3) скорость передачи данных для M -NOMA на 47% выше, чем для NOMA,

для удаленного пользователя 4 (V_4) скорость передачи данных для M -NOMA на 30% выше, чем для NOMA,

– Задержка при 20-битном подсчете:

Для ближайшего пользователя 1 (V_1) задержка для M -NOMA на 77,77% меньше, чем NOMA,

для ближайшего пользователя 2 (V_2) задержка для M -NOMA на 63,63% меньше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 3 (V_3) задержка для M -NOMA на 68,75% меньше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 4 (V_4) задержка для M -NOMA на 92,8% меньше, чем у NOMA.

– Помехи на уровне 30 дБ

Для ближнего пользователя 1 (V_1) помехи для M -NOMA на 80% меньше, чем NOMA,

для ближнего пользователя 2 (V_2) помехи для M -NOMA на 25% меньше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 3 (V_3) помехи для M -NOMA на 60% меньше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 4 (V_4) помехи для M -NOMA на 77,5% меньше, чем для NOMA.

- *RFEN* (Собранная Радиочастотная энергия)

– *RFEN* относительно расстояния пользователя от источника:

RFEN пользователя M -NOMA примерно на 13,6% выше, чем у пользователя NOMA.

– *RFEN* по отношению к передаваемой мощности 3 Вт

Для ближайшего пользователя 1 (U_1) *RFEN* для M -NOMA на 40% выше, чем NOMA,

для ближайшего пользователя 2 (U_2) *RFEN* для M -NOMA на 45% выше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 3 (U_3) *RFEN* для M -NOMA на 20% выше, чем NOMA,

для удаленного пользователя 4 (U_4) *RFEN* для M -NOMA на 5% выше, чем NOMA.

- Энергоэффективность $BEEM$ -NOMA (Встроенная энергоэффективная M -NOMA) дополнительно повышается на 72,2% с помощью *MLGA* (Генетический алгоритм машинного обучения).

- Увеличение $RFEF$ с помощью $MLGA$:

$RFEF$ $MLGA$ - $MNOMA$ (M - $NOMA$ с $MLGA$) на 36% выше, чем $MLGA$ - $NOMA$ ($NOMA$ с $MLGA$),

$RFEF$ $MLGA$ - $MNOMA$ на 78,94% выше M - $NOMA$,

$RFEF$ $MLGA$ - $MNOMA$ на 89,47% выше, чем $NOMA$.

10. Для дальнейшего повышения производительности M - $NOMA$ мы использовали методы модуляции 4 - QAM и 16 - QAM . По сравнению с 4 - QAM , использование 16 - QAM улучшило помехи, скорость передачи данных и пропускную способность. Подробности этого улучшения упомянуты выше.

11. Для связи $IBFD$ мы использовали M - $NOMA$ для разработки нового алгоритма совместной связи, называемого компонент-форвард (CF). Алгоритм компонента-форварда также способствовал эффективности системы по сравнению с обычными системами. CF разработан для уменьшения помех и вычислительной сложности в режиме $IBFD$.

12. В этой диссертации результаты моделирования алгоритма CF для OMA показывают сравнение между CF и DF cooperative communication system.

– Для алгоритма CF моделирование скорости передачи данных выполняется с учетом различных расстояний между реле и источником. Чем больше расстояние между источником и реле, тем меньше расстояние между реле и получателем.

На расстоянии 2 м скорость передачи данных для CF на 14,9% выше, чем для DF -связи.

На расстоянии 4 м скорость передачи данных для CF на 16,9% выше, чем для DF -связи.

На расстоянии 6 м скорость передачи данных для CF на 29,03% выше, чем для DF -связи.

– Емкости секретности:

При 10 дБ уровень емкости секретности для CF на 14,73% выше, чем для DF -связи.

При 20 дБ уровень емкости секретности для CF с нелинейной собранной мощностью на 32,67% выше, чем для DF -связи.

– SoP (вероятность отключения секретности) в зависимости от выбора другого реле и при 20 дБ:

Для реле $K1$ SoP для CF на 34% меньше, чем для связи DF ,

Для реле $K2$ SoP для CF на 32% меньше, чем для связи DF ,

Для реле $K4$ SoP для связи CF на 35% меньше, чем для связи DF .

– Скорость передачи данных (пропускная способность) в зависимости от выбора другого реле и при 20 дБ:

Для реле $K1$ скорость передачи данных для CF на 48,05% меньше, чем для связи DF ,

Для реле $K2$ скорость передачи данных для CF на 56,41% меньше, чем для связи DF ,

Для реле $K4$ скорость передачи данных для CF на 72,63% меньше, чем для связи DF .

13. В этой диссертации алгоритм CF также используется для результатов моделирования $NOMA$ и $M-NOMA$. Результаты показывают сравнение системы совместной связи CF и DF :

– Результаты моделирования для сравнения емкости секретности между связью $IBFD CF$ и $IBFD DF$ включают $FA-MNOMA$ (полнодуплексный и искусственный шум на основе $M-NOMA$), $FD-MNOMA$ (полный дуплекс с $M-NOMA$) и $NOMA$:

емкости секретности для $FA-MNOMA$ на 72,22% выше, чем для $M-NOMA$,

емкости секретности для $FA-MNOMA$ на 77,77% выше, чем для $FD-MNOMA$.

емкости секретности для $FA-MNOMA$ на 72,22% выше, чем для $M-NOMA$,

емкости секретности для $FA-MNOMA$ на 88,88% выше, чем для $NOMA$.

– Использование $MLGA$ показывает, что емкость секретность для $FA-MNOMA$ дополнительно увеличивается на 18,18%.

14. Наряду с основной целью минимизации помех и вычислительной сложности, предлагаемые алгоритмы позволяют оптимизировать:

- скорость передачи данных и пропускной способности,
- число ошибок в символах,
- энергоэффективность,
- способность к секретности,
- вероятность отключения секретности,
- задержку и
- сбор радиочастотной энергии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Khan, R. Hybrid-NOMA for Wireless Communication System (Hybrid-NOMA для беспроводной системы связи) // Труды учебных заведений связи. 2023. Том 9, № 3. С. 104-111. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-3-104-111.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных:

2. Хан Р., “Безопасный Алгоритм Интеллектуальной Транспортной Системы Для Полнодуплексного И Неортогонального Множественного Доступа,” *Научный журнал «Информационные Технологии И Телекоммуникации»*, (submitted) 2022 (ВАК).

3. Khan R., Jayakody D.N.K., “Full Duplex Component-Forward Cooperative Communication for a Secure Wireless Communication System,” *MDPI Electronics*, Dec 2020, <https://doi.org/10.3390/electronics9122102> (WoS/Scopus, Q3, IF:2.397).

4. Khan R., Jayakody D. N. K., “An Ultra-Reliable and Low Latency Communications Assisted Modulation Based Non-Orthogonal Multiple Access Scheme”, *Physical Communication* March 2020, <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101035> (WoS/Scopus, Q3, IF:1.81).

5. Khan R., Kumar P., Jayakody D. N. K. and Liyanage M., "A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies: Potential Solutions, Recent Advancements, and Future Directions," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 196-248, Firstquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2019.2933899 (WoS/Scopus, Q1, IF:37.551).

6. Rajaram A., Khan R., Tharranetharan S., Jayakody D. N. K., Dinis R., & Panic S., Novel SWIPT Schemes for 5G Wireless Networks. *Sensors*, 19(5), 1169, 2019, <https://doi.org/10.3390/s19051169> (WoS/Scopus, Q2, IF: 4.35).

7. Khan R., Jayakody D. N. K., and Chen B., “Non-Orthogonal Multiple Access: Basic Interference management Technique,” *International Journal of Engineering & Technology*, March 2018, <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.28.13212> (Scopus Indexed journal).

8. Khan R., Jayakody D. N. K., “Modulation Based Non-Orthogonal Multiple Access for the Optimization of SWIPT and Energy Efficiency with Machine Learning,” *International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk, Russian Federation, 2019, pp. 1-6 (Scopus).

9. Khan R., Jayakody D. N. K., Pervaiz H. and Tafazolli R., “Modulation Based Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Resilient Networks,” *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6 (Scopus).