

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

Покаместова Дмитрия Алексеевича на диссертацию Хан Рабиа на тему  
**«Разработка алгоритмов для повышения эффективности  
Неортогонального множественного доступа (NOMA) для беспроводных  
сетей»**

по специальности 2.2.15-Системы, сети и устройства телекоммуникаций  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

### **Актуальность темы диссертации**

Улучшение характеристик систем беспроводной связи во многом обеспечивается применением эффективных технологий на физическом уровне. Одной из таких перспективных технологий является группа методов неортогонального множественного доступа (NOMA). NOMA подразумевает передачу сигналов нескольким абонентам одновременно и в одном частотном канале, что для некоторых сценариев повышает количество доступных каналов, спектральную эффективность, снижает сетевую задержку и улучшает другие характеристики связи. Сейчас NOMA является одним из кандидатов для организации множественного доступа в системах связи следующего, шестого поколения. Поскольку в диссертации рассматривается улучшение характеристик NOMA и его совместное применение с другими технологиями, тематика работы несомненно актуальна.

### **Общая характеристика работы**

Работа изложена на 177 страницах, включает в себя введение, четыре главы, заключение, списки сокращений, литературы, рисунков, таблиц и семь приложений.

Во введении обосновывается актуальность исследования и степень его проработанности, формулируется цель и задачи работы, приводятся результаты, свидетельствующие о научной новизне и практической значимости работы, излагаются основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов.

В первой главе описываются некоторые вопросы работы современных систем беспроводной связи: модуляция, безопасность, конфиденциальность, вводится понятие NOMA, формулируются технические ограничения на реализацию систем с неортогональным доступом

Вторая глава посвящена описанию существующего положения дел по тематике NOMA, приведен литературный обзор публикаций, в которых рассматривается применение NOMA с другими технологиями.

В третьей главе описана предлагаемая модификация NOMA, названная M-NOMA. M-NOMA основана на идее разделения мультиплексируемых абонентов на две группы. Первая группа модулирует синфазную часть сигнала, а вторая квадратурная. Таким образом, между группами сохраняется ортогональность, что улучшает ряд характеристик системы связи. Также описывается ряд предложенных решений для систем связи с одновременной передачей энергии и информации, а также для систем с полным дуплексом. Выводятся аналитические выражения для расчета различных показателей эффективности таких систем.

Четвертая глава содержит результаты моделирования предложенных методов и алгоритмов. Приводится ряд характеристик: скорость передачи, вероятности ошибок, задержка и др.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Научные положения и выводы, представленные в диссертации, обоснованы корректным использованием классических подходов и опираются на результаты уже известных работ.

Выносимые на защиту положения достаточно полно отражены в 9 опубликованных по теме диссертации научных работах, в том числе две работы в журналах из перечня ВАК, 7 работ в изданиях, индексируемых в WoS, Scopus (в том числе одна работа в журнале, входящем в Q1, одна работа в Q2, две работы в Q3).

## Научная новизна

Заключается в разработке модифицированного алгоритма NOMA на основе разделения мультиплексируемых абонентов на две группы, каждая из которых передает сигналы только на одной из квадратур. Были рассмотрены различные конфигурации такого мультиплексирования, выведены аналитические выражения для основных характеристик системы связи. Кроме того, был предложен подход к организации полнодуплексной системы связи с NOMA

## Научная и практическая ценность работы

Обусловлена разработкой алгоритмов для систем связи с NOMA, способных улучшить помехоустойчивость, увеличить скорость передачи, снизить вычислительную сложность обработки сигналов. Предложенные решения могут применяться на практике в системах связи следующих поколений.

## Замечания по работе

1. Основным недостатком является большое число синтаксических ошибок и невысокое качество оформления. Этот факт серьезно затрудняет восприятие работы. Многие термины переведены на русский (который, очевидно, является не родным языком соискательницы) с ошибками. Приведем только отдельные примеры:

стр. 19 вместо «код Грея» употребляется *«серое преобразование»*

стр. 20 *«...из-за таких недостатков OFDM, как потеря мощности в результате самопомех, ложное излучение и искажение интермодуляции...».*

стр. 54 и далее по тексту вместо «мнимый компонент» употребляется *«воображаемый компонент»*. В некоторых местах в том же смысле употребляется *«виртуальный компонент»*.

Отметим, что смысл большинства утверждений можно понять, опираясь на общеизвестные факты и математические выражения, приведенные в работе.

Вместе с тем, описание формул тоже не лишено недостатков. Некоторые примеры:

В (3.22) и далее не пояснено что такое  $K_n$  и какая размерность этой величины.

В (3.22) и далее не пояснено что такое  $\gamma$ .

В (3.25) пропущены скобки.

В (3.28), вероятно, не совпадают размерности (слева мощность, справа произведение корня от мощности и неких коэффициентов, включая величины  $\gamma K_n$ , не поясненные выше).

Не расшифрованы аббревиатуры (PLS, CR, MLGA, RFEH, и др.).

В списке сокращений (стр. 152) пропущена (не отображается) большая часть обозначений (так называемых акронимов).

2. В разделе 3.2.1.1 рассматривается сценарий восходящего (uplink) канала, в котором два пользователя передают сигналы одновременно, притом первый формирует символ на реальной (I), а второй на мнимой (Q) квадратуре. Утверждается, что формируемые абонентские каналы являются ортогональными, однако это не так, поскольку фазы абонентских сигналов случайны. Таким образом, вывод этого подраздела о том, что в рассматриваемом сценарии можно не выполнять алгоритм SIC считаю не обоснованным.

3. В разделе 1.3.1 в качестве мер обеспечения безопасности (секретности) указывается применение LDPC и «Polar» кодов. Отметим, что, судя по всему, под «Polar» имеются в виду полярные коды, которые, как и LDPC относятся к канальным и не обеспечивают безопасность связи в смысле защиты информации.

4. Приведено выражение для вероятности ошибок (3.45), Лемма 2. Доказательство Леммы 2 приведено в Приложении В. Однако, итоговое выражение в Приложении В отличается от (3.45).

5. В разделе 3.3.1.3 предлагается использование искусственного шума для обеспечения безопасности связи и невозможности прослушки злоумышленником. Такой шум должен быть элементом ядра (нулевого пространства) канальной матрицы абонента. В работе [Goel, S., & Negi, R., "Guaranteeing secrecy using artificial noise," IEEE transactions on wireless

communications, vol. 7, no. 6, pp. 2180--2189, 2008.], где предлагается идея применения искусственного шума, рассматривается MIMO канал, как и в большинстве других работ по этой тематике. В диссертации же рассматривается SISO канал, и непонятен механизм поиска искусственного шума с учетом того, что канальная матрица содержит всего один элемент.

6. На рисунке 4.3 приведено сравнение скоростей передачи для различных методов NOMA. Зависимости накладываются друг на друга и слабо различимы (6 зависимостей, но всего 3 видимых линии). Кроме того, если имеется в виду нормированная на полосу скорость (спектральная эффективность), то в SISO-NOMA канале при отношении сигнал-шум 6 дБ значение более 10 бит/с/Гц для одного абонента выглядит неправдоподобно. К сожалению, методика получения зависимостей на рисунке 4.3 не описана. Аналогичное замечание касается рисунка 4.4

7. На рисунке 4.7 приведены результаты оценки скоростей передачи для четырех абонентов, мультиплексируемых двумя различными методами NOMA. Результат, при котором скорости практически не меняются в рассматриваемом диапазоне отношений сигнал-шум (от 0 до 25 дБ) выглядит странным.

### **Общее заключение**

Несмотря на указанные замечания, считаю, что диссертационная работа Хан Рабиа «Разработка алгоритмов для повышения эффективности Неортогонального множественного доступа (NOMA) для беспроводных сетей» является законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной теме и обладает научной новизной и практической значимостью.

Результаты работы достоверны, обоснованы и представлены в публикациях высокого уровня. Апробация работы проведена в соответствии с принятыми нормами. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 и заслуживает положительной оценки. Автор работы Хан Рабиа заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Официальный оппонент:

доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники»

(634050, г. Томск, пр. Ленина, 40;

(3822) 51-05-30; rector@tusur.ru; <https://tusur.ru/>),

кандидат технических наук



Покаместов Дмитрий Алексеевич

19.01.2023

Подпись Д.А. Покаместова заверена

Ученый секретарь Ученого совета



 - Е. В. Прокопчук