

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

кандидата технических наук Буркова Артёма Андреевича

на диссертацию Ермолаева Григория Александровича на тему

«Разработка и исследование методов повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной широкополосной связи пятого поколения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

### **1. Актуальность темы диссертации.**

В настоящее время все более активно происходит повсеместное внедрение систем связи пятого поколения. Несмотря на увеличение спектральной эффективности по сравнению с сетями четвертого поколения, для обеспечения более высокой скорости передачи в сетях пятого поколения требуется расширение используемых полос частот и переход на более высокие частотные диапазоны. Данные факторы приводят как к увеличению потребления энергии мобильным устройством пользователя в системах связи пятого поколения, так и к снижению помехоустойчивости при передаче информации по каналу. Таким образом, актуальной является задача повышения энергоэффективности при работе пользовательских устройств и повышение помехоустойчивости в системах связи пятого поколения.

Диссертационная работа Ермолаева Григория Александровича «Разработка и исследование методов повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной широкополосной связи пятого поколения» посвящена как рассмотрению методов управления режимами активности устройств в сетях пятого поколения, позволяющим уменьшить энергозатраты за счёт прерывистого приема данных от базовой станции, так и вопросам повышения помехоустойчивости. Таким образом, можно утверждать, что тема диссертации и проводимые в рамках диссертационной работы исследования являются актуальными и направлены на решение важных задач,

возникающих в сетях пятого поколения.

## **2. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность и степень обоснованности основных результатов, полученных в диссертации Ермолаева Григория Александровича, подтверждается корректным применением моделей и схем, разработанных международным консорциумом 3GPP, адекватностью результатов анализа на основе моделирования на физическом и системном уровнях, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях, а также публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

## **3. Новизна полученных результатов**

Полученным результатам присуща научная новизна, требуемая для диссертаций, представляемых к защите на соискание степени кандидата технических наук. Научная новизна работы обусловлена следующими основными результатами работы:

1. Разработаны методы повышения энергоэффективности пользовательских устройств при работе в системах связи пятого поколения, основанные на передаче специализированной контрольной информации для динамического перехода пользовательского оборудования в режим энергосбережения и выхода из него.

2. Разработаны схемы по повышению помехоустойчивости систем связи пятого поколения при передаче данных по восходящему каналу связи, т.е. от пользовательского оборудования базовой станции. Полученный комплекс схем позволяет добиться успешной передачи данных при отношении сигнал-шум-помеха (ОСПШ) на 2 дБ ниже существующего порогового значения.

3. Разработан метод борьбы с нелинейными искажениями сигнала, вызванными на передатчике мобильного устройства пользователя, основанный на статистической обработке символов принятых сигналов на стороне приемника.



#### **4. Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании моделей и сценариев моделирования систем связи пятого поколения с целью изучения их энергоэффективности и помехоустойчивости. Самостоятельную теоретическую значимость имеет исследование моделей нелинейных искажений и методов их компенсации.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что предложенные в диссертации методы внедрены в стандарт систем связи пятого поколения релизов New Radio Release 16-17, а также могут быть использованы на практике для решения задачи повышения помехоустойчивости и энергоэффективности при создании устройств для систем связи последующих поколений.

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

#### **5. Публикации по теме диссертации.**

Основные результаты диссертации изложены в 8 работах. Из которых 4 – статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК, 2 – статьи в сборнике докладов конференций, рецензируемых в международных базах данных SCOPUS и Web of Science, 2 – статьи в сборниках докладов конференций, включенных в РИНЦ. Также по результатам диссертации получено 7 патентов.

#### **6. Характеристика содержания диссертационной работы.**

Диссертация представлена в виде рукописи и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 126 страниц. Работа содержит 53

рисунка, 23 таблицы. Список литературы содержит 60 источников. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы исследования и описывается степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, описаны научная новизна результатов, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** приводится аналитический обзор, посвященный системам мобильной широкополосной связи пятого поколения, и рассмотрены сценарии использования систем связи 5G. Описан ряд проблем, возникающих при развертывании систем связи 5G. Рассмотрены методы энергосбережения для пользовательского оборудования (UE) и повышения помехоустойчивости мобильных систем связи 5G. Описаны возможные направления разработки новых методов или усовершенствования существующих методов.

**Во второй главе** представлены схемы повышения энергосбережения для систем связи 5G NR, основанные на адаптации схемы прерывистого приема (DRX) за счет использования специализированных сигналов: сигнал пробуждения UE и сигнал перехода UE в режим сна. Описаны сценарии моделирования и модели трафика данных, рассматриваемых в рамках проводимых исследований. Эффективность предложенных алгоритмов энергосбережения оценивается путем компьютерного моделирования.

Полученные в главе результаты сформулированы в первом положении, выносимом на защиту.

**В третьей главе** рассматривается задача повышения помехоустойчивости систем связи 5G NR. Описаны методы уменьшения вероятности блоковой ошибки для UE на границе ячейки сотовой связи 5G. Сформулированы подход к передаче данных по каналу PUSCH в плохих условиях канала, основанный на мультислотовой передаче и схема выбора бит из циклического буфера LDPC кодов для операции согласования скорости



кодирования. Описаны модели каналов связи, рассматриваемые при моделировании. Изучение эффективности предложенных методов выполнено с помощью компьютерного моделирования.

Полученные в главе результаты сформулированы во втором положении, выносимом на защиту.

**В четвёртой главе** описана задача компенсации нелинейных искажений, возникающих на стороне передатчика. Предложен и исследован новый метод компенсации нелинейных искажений, основанный на прямом статистическом анализе принятых символов данных для оценки искажения и использования этих оценок в процессе демодуляции и декодирования. Приводятся результаты компьютерного моделирования, проведенного с использованием симулятора физического уровня.

Полученные в главе результаты сформулированы в третьем положении, выносимом на защиту.

**В заключении** автор приводит перечень полученных результатов.

## **7. Замечания по содержанию и оформлению диссертации.**

1. Для снижения энергозатрат при работе схемы прерывистого приёма (DRX) в работе предложено введение двух дополнительных сигналов. Один для пробуждения пользовательского устройства (UE), второй для перевода UE в режим сна. Сигнал пробуждения передаётся каждому UE перед DRX циклом и сообщает о наличии/отсутствии данных для UE (раздел 2.2.1 стр. 49). Автору следовало бы уточнить о возможности реализации передачи такой информации каждому UE при наличии большого числа UE в области одной базовой станции в рамках ограниченного ресурса нисходящего канала.

2. При анализе эффективности внедрения сигнала пробуждения в начало цикла DRX указано, что затраты энергии на приём данной информации ниже, чем затраты на приём стандартной информации в начале цикла DRX во время таймера «on duration». Однако не указывается чему равна и чем обусловлена разница в затратах энергии на приём такой информации.

3. В работе приводится косвенное сравнение стандартного режима DRX

и режима DRX с добавлением сигнала пробуждения путем сравнения энергетического выигрыша каждого из подходов с базовым сценарием, когда UE всегда остаются в активном режиме. Более наглядным с точки зрения оценки эффективности от внедрения сигнала пробуждения было бы показать результаты прямого сравнения по энергозатратам данных режимов DRX.

4. При рассмотрении влияние внедрения сигнала перехода UE в режим сна указывается, что его использование может увеличить задержку в системе для некоторых из рассмотренных в работе моделей трафиков. Возможно, необходимо дополнительно уточнить насколько критично такое увеличение для определенных типов трафиков с точки зрения пользовательского опыта.

5. В третьей главе не освещена причина выбора конкретных моделей каналов при моделировании систем связи пятого поколения на физическом уровне и учитывалось ли при получении результатов влияние других UE находящихся в сети (или рассматривался канал в сценарии: одно пользовательское устройство и одна базовая станция).

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

## **8. Заключение.**

Диссертация Ермолаева Григория Александровича на тему «Разработка и исследование методов повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной широкополосной связи пятого поколения» является законченной научно-квалификационной работой, выполнена под руководством доктора физико-математических наук, профессора, Мальцева Александра Александровича и содержит решение научной задачи по повышению энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной широкополосной связи пятого поколения. Диссертация соответствует пунктам 2, 7 и 18 специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с принятыми для научных квалификационных работ нормами и требованиями. Автореферат адекватно и в полной мере отражает основные научные результаты и



положения, сформулированные в тексте диссертации.

Работа соответствует критериям, предъявляемым в отношении кандидатских/докторских диссертаций, которые установлены пп.9–14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор Ермолаев Григорий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

«05» июня 2024

Официальный оппонент,

Старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,

к. т. н.

 Бурков Артём Андреевич



Сведения об организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Почтовый адрес: 190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Телефон: +7 (812) 710-65-10. Сайт: <https://guap.ru>. Email: [info@guap.ru](mailto:info@guap.ru)