

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу  
Ермолаева Григория Александровича «Разработка и исследование методов  
повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной  
широкополосной связи пятого поколения» на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по научной специальности 2.2.15 – Системы,  
сети и устройства телекоммуникаций

Диссертационная работа Г.А. Ермолаева подготовлена на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи (СР МСС) радиофизического факультета ННГУ и посвящена разработке и исследованию методов повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем мобильной широкополосной связи пятого поколения.

В течение последних двух десятилетий был внедрен целый ряд поколений систем сотовой мобильной связи, начиная с 2G и заканчивая четвертым поколением 4G LTE-A. По сравнению с 4G, системы связи пятого поколения 5G стандарта New Radio (NR) должны обеспечивать гораздо более высокую скорость и сверхмалую задержку передачи данных за счет использования большего числа высокочастотных диапазонов и передовых сетевых технологий. Первоначальное внедрение инфраструктуры сотовой связи 5G NR сосредоточено на улучшенной мобильной широкополосной связи для обеспечения повышенной пропускной способности передачи данных и надежности соединения в диапазоне радиочастот до 6 ГГц. В системах связи 5G в первой волне развертывания, т.е. в неавтономных системах 5G, пользовательские устройства с поддержкой сетей пятого поколения работают в полосе частот 5G для повышения пропускной способности передачи данных, но по-прежнему используют 4G для задач, не связанных с передачей данных, например, таких как связь с вышками сотовой связи и серверами. Это является причиной определенных недостатков систем связи 5G первой волны развертывания, таких как: высокое энергопотребление из-за увеличения вычислительной нагрузки для обеспечения повышенной пропускной способности передачи данных и надежности соединения; низкий уровень мощности принятого сигнала базовой станцией от пользовательского оборудования при работе в сетях связи 5G по причине увеличения рабочей частоты передаваемого сигнала; нелинейные искажения сигнала, возникающие на передатчике пользовательского оборудования.

Таким образом, поставленная в диссертации Г.А. Ермолаева задача разработки и исследования методов снижения энергопотребления и вероятности пакетных ошибок в системах беспроводной мобильной связи пятого поколения является весьма актуальной для дальнейшего успешного развертывания систем связи пятого поколения. Актуальность выбранной темы диссертации подтверждается также большим числом публикаций в научно-технических изданиях, посвященных этому вопросу, разработкой новых релизов стандартов сотовой связи (5G NR) и активной работой, проводимой в данном направлении в ведущих компаниях-производителях коммуникационного оборудования (Huawei, Samsung, Intel, LG, Ericson, Nokia и др.).

Ермолаев Г.А. закончил магистратуру радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского по направлению подготовки 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» в 2018 году. В период с 2018 по 2022 г. обучался в аспирантуре. Одновременно с учебой в аспирантуре он работал по совместительству на кафедре СР МСС в должности младшего научного сотрудника. Тема диссертации Г.А. Ермолаева сформировалась в ходе его работы на кафедре, участия в выполнении научно-исследовательских и хозяйственных работ, проводимых в интересах ИТ компаний, а также в ходе его работы в исследовательских центрах ИТ компаний.

В диссертационной работе Г.А. Ермолаева были решены важные теоретические и прикладные задачи.

В первой главе представлен подробный анализ методов, используемых в системах связи 4G и 5G для повышения энергоэффективности и помехоустойчивости пользовательского оборудования, установлены проблемные места систем связи пятого поколения начального релиза NR Release 15 и определены возможные направления разработки новых методов и усовершенствования используемых методов и алгоритмов для повышения энергоэффективности и помехоустойчивости систем связи.

Во второй главе диссертации рассмотрена задача повышения эффективности энергосбережения пользовательского оборудования в системах беспроводной мобильной связи. В ходе работы были реализованы сценарии моделирования систем беспроводной мобильной связи и модели трафика данных, принятые консорциумом 3GPP, а также проведен подробный анализ работы схемы прерывистого приема, используемой для энергосбережения пользовательского оборудования в первом релизе NR Release 15 систем сотовой мобильной связи пятого поколения 5G. В работе предложены новые методы повышения энергоэффективности пользовательского оборудования, основанные на адаптации схемы прерывистого приема к поступающему трафику для конкретного пользовательского оборудования за счет использования специализированных сигналов пробуждения этого пользовательского оборудования и перевода этого пользовательского оборудования в режим сна. Эффективность предложенных алгоритмов энергосбережения пользовательского оборудования в системах связи 5G детально изучена путем имитационного моделирования сетей беспроводной связи стандарта NR Release 15 на системном уровне.

Третья глава посвящена задаче снижения порога помехоустойчивости систем беспроводной мобильной связи. Представлены методы для уменьшения вероятности блоковой ошибки пользовательского оборудования на границе ячейки систем сотовой связи 5G, т.е. для сценария плохого состояния канала. В том числе был представлен новый тип мультислотовой передачи данных по восходящему каналу связи систем 5G, имеющий ряд отличий и улучшений относительно схемы повторения передачи. Также были рассмотрены новые методы перестройки частоты внутри слота и между слотами в 5G, и метод совместной оценки канала с межслотовым объединением опорных сигналов демодуляции. Эффективность в снижении порога помехоустойчивости путем использования предложенных алгоритмов в системах связи 5G была изучена путем компьютерного имитационного моделирования беспроводных сетей связи на физическом уровне.

В четвертой главе предложен и исследован новый метод компенсации нелинейных искажений, возникающих на стороне передатчика, путем дополнительной обработки сигналов на стороне приемника для систем беспроводной связи. Метод основан на прямом статистическом анализе принятых символов данных для оценки искажения и использования этих оценок в процессе демодуляции и декодирования. Результаты моделирования показали, что разработанный самообучающийся алгоритм борьбы с нелинейными искажениями демонстрирует очень хороший уровень компенсации в случае дисбаланса I/Q компонент и нуждается в дальнейшем улучшении производительности для случая, когда на стороне передатчика также присутствует нелинейность усилителя мощности. По сравнению с известными схемами предварительного искажения передаваемого сигнала для компенсации нелинейных искажений передатчика, разработанный самообучающийся алгоритм намного менее сложен и поэтому может быть использован для применения в сетях Интернета вещей в системах связи 5G, а также в процессе разработки устройств следующих поколений систем беспроводной связи

Полученные в диссертации результаты имеют прямую практическую направленность, так как используются в системах мобильной сотовой связи пятого, а также могут быть использованы в системах связи последующих поколений.

При выполнении диссертационной работы Г.А. Ермолаев проявил большую самостоятельность и целеустремленность, творческий подход к решению сложных задач.

Г.А. Ермолаев является высококвалифицированным специалистом в области систем, сетей и устройств телекоммуникаций, он активно занимается научной работой совместно с преподавателями кафедры СР МСС и пользуется уважением в коллективе кафедры.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах.

Считаю, что диссертационная работа Г.А. Ермолаева удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Научный руководитель, профессор,  
доктор физ.-мат. наук (01.04.03 – радиофизика,  
05.12.01 – теоретические основы радиотехники),  
заведующий кафедрой статистической радиофизики и  
мобильных систем связи радиофизического факультета  
Нижегородского государственного университета  
им. Н.И. Лобачевского  
Мальцев Александр Александрович

Адрес:

603022, г. Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23, ННГУ

e-mail: [maltsev@rf.unn.ru](mailto:maltsev@rf.unn.ru)

Тел. +7(831)4656153

