

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Степанова Михаила Сергеевича

на диссертационную работу Голос Елизаветы Сергеевны на тему «Построение вероятностных моделей микро- и макромобильности для анализа энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио»», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы диссертационной работы

В сетях 5G «Новое радио» миллиметрового диапазона FR2 использование узконаправленных лучей фазированных антенных решёток делает физический уровень соединения критически зависимым от двух групп стохастических факторов. Первая — макромобильность: повороты и встряхивания устройства в руке пользователя, приводящие к угловым рассогласованиям осей диаграмм направленности. Вторая — макромобильность: появление блокаторов (люди, транспорт, инфраструктура) на линии прямой видимости между пользовательским устройством и базовой станцией. Оба типа возмущений инициируют энергозатратные процедуры поиска луча и управления радиоканалом.

Для компенсации этих эффектов 3GPP предложена функция мультисвязности — одновременное удержание соединения с несколькими базовыми станциями. Однако, как показано в литературе, мультисвязность линейно увеличивает энергопотребление пользовательского устройства за счёт поддержки резервных каналов. Параллельно стандартизированы механизмы энергосбережения: прерывистый приём (DRX), сигнал пробуждения (WUS) и релаксация управления радиоресурсами (RRM-relaxation). Их эффективность в условиях совместного действия микро- и макромобильности, а также при использовании мультисвязности, не изучена.

Таким образом, актуальность диссертации обусловлена отсутствием комплексных вероятностных моделей, описывающих взаимное влияние перечисленных факторов. Разработка моделей необходима для аналитического расчёта энергопотребления, энергоэффективности, спектральной эффективности и времени работы батареи пользовательского устройства в сетях 5G NR.

На основе вышесказанного можно утверждать, что тема диссертационной работы Голос Елизаветы Сергеевны «Построение вероятностных моделей микро- и макромобильности для анализа энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио»», а также ее цель, которая заключается в разработке математических моделей для анализа и расчета показателей эффективности механизмов макро- и макромобильности, и энергоэффективности сети крайне актуальны и полностью соответствуют специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика».

Содержание диссертации

Диссертационная работа Голос Е.С. включает в себя введение, три главы и заключение, список основных сокращений, список основных обозначений, список литературы из 139 наименований и пять приложений. Работа изложена на 159 страницах, включая приложения.

Диссертация построена по принципу последовательного усложнения задач. Введение содержит обоснование актуальности, постановку цели и задач, а также формулировку научной новизны и практической значимости работы.

В первой главе приведены особенности систем связи в миллиметровом диапазоне FR2, построены базовые модели микро- и макромобильности, а также даны определения показателей энергоэффективности. Основным результатом являются аналитические выражения для функции распределения длительности непрерывного соединения пользовательского устройства с сетью.

Во второй главе на основе базовых моделей первой главы разрабатывается трёхуровневая модель в виде поглощающих цепей Маркова, которая учитывает переключение между приложениями, взаимодействие с основной и резервной базовыми станциями, а также работу механизма «прерывистый прием». Это позволяет провести сравнительный анализ трёх практических сценариев двойного подключения.

Третья глава посвящена энергоэффективности устройств с урезанной функциональностью Reduced Capability, типичных для систем промышленного интернета вещей. Здесь автор переходит от экспоненциальных аппроксимаций к диффузионным моделям перемещения пользователя, что позволяет детально отслеживать динамику отношения сигнал-шум. Для анализа комбинации механизмов прерывистого приема, сигнала пробуждения, релаксации управления радиоресурсами построена двухуровневая цепь Маркова.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций подтверждается строгим использованием математического аппарата, включающего методы теории вероятностей, марковских случайных процессов, стохастической геометрии, а также экспериментами и численным анализом.

Научная новизна заключается в следующем: впервые предложена многоуровневая (трёхуровневая) модель цепи Маркова для анализа двойного подключения, учитывающая на разных уровнях иерархии приложения пользователя, сценарии inter-/intra-RAT и работу DRX, выполнено сравнение трёх сценариев двойного подключения не только по энергопотреблению, но и по времени работы батареи с учётом структуры трафика реального пользователя и для устройств RedCap предложена двухуровневая модель, объединяющая RRM-релаксацию и комбинацию механизмов энергосбережения.

Таким образом, результаты диссертации обладают высокой степенью достоверности и содержат значительную научную новизну, что подтверждает их вклад в развитие теории массового обслуживания и полезность для задач планирования и эксплуатации беспроводных сетей пятого и последующих поколений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность полученных в диссертации результатов следует из использования строгих математических методов теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории случайных процессов и математической теории телетрафика, а также проведенных численных экспериментов.

Представленные в диссертационной работе результаты достаточно полно апробированы на всероссийских и международных конференциях, что также

свидетельствует о достоверности и обоснованности изложенных в диссертации результатов.

Ценность для науки и практики результатов работы

Теоретическая ценность работы состоит в развитии метода анализа энергоэффективности через фундаментальные матрицы поглощающих цепей Маркова. Предложенные модели могут быть адаптированы для анализа терагерцевых сетей 6G, что уже частично реализовано в работах автора по гранту РФФИ.

Практическая ценность заключается в возможности использования полученных рекомендаций операторами связи при настройке параметров DRX, выборе стратегии мультисвязности и оптимизации энергопотребления сетей 5G «Новое радио».

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Результаты исследования представлены в 7 публикациях, 3 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, одна – в журнале из списка изданий, рекомендованных ВАК. По теме диссертации автором получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат логически выстроен, хорошо структурирован, правильно и в достаточной мере отражает содержание диссертационной работы. Как часть выполненной научной работы автореферат отражает компетентность автора в области проводимых исследований и хорошее владение используемыми математическими методами.

Замечания по диссертационной работе

1. Хотя литературный обзор по теме диссертации выполнен на достаточном уровне, чтобы обосновать актуальность работы для сетей 5G «Новое радио» и отличие от известных результатов других авторов, обзор мог быть расширен за счет работ по анализу энергоэффективности сетей 4G.

2. В диссертационной работе недостаточно полно отражена верификация разработанных моделей.

3. Возможно ли использовать предложенные в диссертации модели и методы для настройки значений таймеров механизмов DRX и RRM-relaxation?

4. На рис. 1.4. диссертации второй интервал T_C не должен начинаться раньше второго интервала T_O .

5. В приложении 1 диссертации сбой в обозначениях: вместо не встречающихся в диссертации величин « n_{CLS} » и « p_{CLS} » следовало написать « N_{LS} » и « p_{LS} »; в Приложении 3 вместо « $f_{DL}(x)$ » и « $f_{RT}(x)$ » следовало написать « $f_O(x)$ » и « $f_C_{RRM}(x)$ ». Кроме этих, в диссертации есть другие мелкие опечатки.

Приведённые замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на её положительную оценку.

Заключение

Диссертационное исследование Голос Елизаветы Сергеевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи разработки математической модели состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью подвижной связи «Новое радио», позволяющей оценить энергопотребление, энергоэффективность и время работы батареи пользовательского устройства при применении механизмов энергосбережения в сети с функцией мультисвязности в зависимости от параметров моделей микро- и макромобильности для сценариев внутрисетевого и межсетевого подключения.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук согласно пункту 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утверждённого Учёным советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а её автор, Голос Елизавета Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Официальный оппонент

Степанов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук (05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций), доцент, доцент кафедры Интеллектуальные сетевые и облачные технологии факультета Сетевая инженерия Ордена Трудового Красного Знамени Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики».

Подпись Степанова Михаила Сергеевича удостоверяю.

Подпись руки Степанова М.С. заверяю
Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ
кандидат биологических наук, доцент



В.В. Ерофеева

01.06.2026

Ордена Трудового Красного Знамени Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»

Адрес: 111024, г. Москва, улица Авиамоторная, 8а

Тел. +7 (495) 957-77-77, e-mail: mtuci@mtuci.ru

Страница в интернете: <https://mtuci.ru>