

На правах рукописи

Голос Елизавета Сергеевна

**ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ МИКРО-
И МАКРОМОБИЛЬНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
СВЯЗИ «НОВОЕ РАДИО»**

Специальность 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Научный руководитель: **Гайдамака Юлия Васильевна**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теории вероятностей и кибербезопасности ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»;

Семёнова Ольга Валерьевна
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБ УН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН»;

Степанов Михаил Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных сетевых и облачных технологий ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики».

Защита диссертации состоится 19 июня 2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ПДС 0200.006 при Российском университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 208.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 0200.006
канд. физ.-мат. наук, доц.



М.Н. Геворкян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Переход в сетях пятого поколения (5G) к технологии «Новое радио» (New Radio, NR) в высокочастотном миллиметровом диапазоне (FR2/mmWave) открывает принципиально новые возможности по скорости и пропускной способности, но одновременно порождает проблемы, не характерные для сетей предыдущих поколений. Использование узконаправленных лучей для компенсации высокого затухания сигнала делает соединение критически зависимым от точного выравнивания антенн приемопередающих устройств и наличия прямой видимости между пользовательским устройством и базовой станцией. В этих условиях даже незначительные внешние факторы — поворот устройства в руке пользователя (микромобильность) или появление случайного препятствия на пути сигнала (макромобильность) — приводят к рассогласованию лучей и разрыву соединения, требуя частого выполнения энергозатратных процедур управления лучом и радиоканалом.

Для обеспечения непрерывности обслуживания в этих условиях консорциумом 3GPP предложена функция мультисвязности, позволяющая устройству одновременно поддерживать соединение с несколькими базовыми станциями. Однако, как показывают исследования, платой за надежность становится дополнительный расход энергии на поддержание резервных каналов, что в совокупности с частыми процедурами поиска луча и хэндовера приводит к существенно более высокому энергопотреблению пользовательского устройства по сравнению с сетями 4G. Учитывая, что питание пользовательского устройства осуществляется от аккумуляторной батареи ограниченной емкости, проблема энергоэффективности выходит на первый план, непосредственно влияя на время автономной работы пользовательского устройства.

Таким образом, для поддержания требуемого качества обслуживания в сетях «Новое радио» на первый план выходит задача разработки и анализа механизмов энергосбережения, ставшая критически важной для успешного внедрения и эксплуатации сетей 5G. Несмотря на наличие стандартизированных решений, таких как механизм «прерывистый прием» (Discontinuous Reception, DRX), «сигнал пробуждения» (Wake-Up Signal, WUS) и «релаксация управления радиоресурсами» (Radio Resource Management Relaxation, RRM-relaxation), их

эффективность в условиях совместного действия микро- и макромобильности, а также при использовании мультисвязности, остается недостаточно изученной. Это определяет необходимость разработки математических моделей, позволяющих оценить энергоэффективность пользовательского устройства в различных сценариях и выработать практические рекомендации по применению технологий энергосбережения в высокочастотных беспроводных мобильных сетях новых поколений.

Степень разработанности темы. Для анализа показателей энергоэффективности беспроводных сетей «Новое радио» построены математические модели, основанные на теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, в том числе цепей Маркова (ЦМ), теории массового обслуживания, теории телетрафика и стохастической геометрии. К российским и зарубежным ученым, исследователям, внесшим большой вклад в эти области и практическое применение результатов к анализу сетей связи, относятся Башарин Г.П., Вишневецкий В.М., Гайдамака Ю.В., Дворкович А.В., Крук Е.А., Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Моисеева С.П., Молчанов Д.А., Назаров А.А., Наумов В.А., Парамонов А.И., Пауль С.В., Печинкин А.В., Пшеничников А.П., Самуйлов К.Е., Семёнова О.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Хоров Е.М., Цитович И.И., L.M. Correia, J. M. Jornet, T. Kim, G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, S. Rostami.

Цель диссертационной работы: разработка математических моделей в виде ЦМ для анализа и расчета показателей эффективности механизмов макро- и макромобильности, и энергоэффективности в беспроводных сетях «Новое радио».

Для достижения этой цели в диссертационной работе решаются следующие задачи.

1. Разработать математические модели, позволяющие оценить энергопотребление и энергоэффективность пользовательского устройства с учетом микро- и макромобильности при применении механизма «прерывистый прием» и мультисвязности.
2. Разработать математическую модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде поглощающей ЦМ, позволяющей оценить энергопотребление, энергоэффективность и время работы батареи пользовательского устройства при применении

механизма «прерывистый прием» и мультисвязности с двойным подключением в зависимости от плотности блокаторов и базовых станций для трех сценариев внутрисетевого и межсетевого подключения и типов приложений.

3. Разработать математическую модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде поглощающей ЦМ, позволяющей оценить спектральную эффективность, энергоэффективность и время работы батареи пользовательского устройства при комбинировании механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами» в зависимости от параметров микромобильности и плотности блокаторов, числе антенных элементов и типах приложений.

Научная новизна диссертационной работы.

1. В отличие от известных моделей микро- и макромобильности разработанные модели в виде многоуровневых ЦМ позволили провести анализ четырех показателей энергоэффективности пользовательского устройства (энергопотребление, энергоэффективность, спектральную эффективность и время работы батареи) в течение непрерывного соединения с сетью при одновременном учете всех особенностей процедур установления и поддержания соединения в беспроводных сетях «Новое радио», а именно микро- и макромобильности, внутрисетевой и межсетевого мультисвязности, применении нескольких механизмов энергосбережения и их комбинаций.
2. На основе разработанной комбинированной модели состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде трехуровневой ЦМ выполнен сравнительный анализ энергоэффективности пользовательского устройства с функцией мультисвязности при одновременном учете микро- и макромобильности в трех сценариях двойного подключения, который ранее для указанных сценариев внутрисетевой и межсетевого мультисвязности не проводился.
3. На основе разработанной комбинированной модели состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде двухуровневой ЦМ выполнен сравнительный анализ энергоэффективности пользовательского устройства при применении механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал

пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами» а также их комбинаций, который ранее не проводился.

Теоретическая и практическая значимость работы. *Теоретическая значимость* диссертационной работы заключается в развитии математического аппарата для анализа беспроводных сетей «Новое радио»: предложены оригинальные методы аппроксимации распределений случайных интервалов микро- и макромобильности, разработаны многоуровневые модели в виде поглощающих ЦМ, позволяющие учитывать взаимное влияние характера трафика приложений, функции мультисвязности и механизмов энергосбережения, что расширяет теоретическую базу исследований в области теории телетрафика и стохастического моделирования систем сетей связи.

Практическая значимость работы подтверждается выработкой конкретных рекомендаций для операторов связи и разработчиков оборудования: определены условия эффективного применения различных сценариев двойного подключения в зависимости от плотности блокаторов и типа приложений, установлены границы целесообразности использования мультисвязности с учетом скорости микромобильности, а также предложены эффективные комбинации механизмов энергосбережения для устройств RedCap в сценариях промышленного интернета вещей, что позволяет повысить время автономной работы пользовательских устройств без ущерба для качества обслуживания.

Методы исследования. В диссертации применяются методы теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, в т.ч. ЦМ, теории массового обслуживания, стохастической геометрии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Длительность интервала до наступления события микромобильности пользовательского устройства можно оценить с помощью предложенной аппроксимации распределения показательной функцией, параметр которой вычисляется по разработанному алгоритму и зависит от скоростей перемещения пользовательского устройства и угловых отклонений луча фазированных антенных решеток пользовательского устройства при микромобильности.
2. Длительность интервала до наступления события макромобильности пользовательского устройства с функцией мультисвязности можно оценить с помощью предложенной аппроксимации распределения показательной

функцией, параметр которой вычисляется с помощью разработанного метода с учетом наличия нескольких блокаторов прямой видимости между пользовательским устройством и базовой станцией.

3. Построенная модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде трехуровневой ЦМ позволяет провести сравнительный анализ показателей энергоэффективности пользовательского устройства, в т.ч. спектральной эффективности, энергопотребления, энергоэффективности и времени работы батареи, в сценариях двойного подключения для внутрисетевой и межсетевой мультисвязности.
4. Построенная модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде двухуровневой ЦМ позволяет провести сравнительный анализ указанных в п.3 показателей энергоэффективности пользовательского устройства при комбинировании механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами».

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием при доказательствах утверждений известных методов теории массового обслуживания, марковских случайных процессов и стохастической геометрии, идея комбинирования механизмов энергосбережения базируется на обобщении передового опыта в области анализа энергоэффективности сетей 4G и 5G; установлено качественное совпадение частных случаев разработанных автором моделей с известными моделями теории случайных процессов, а также количественное совпадение с известными по публикациям результатами имитационного моделирования.

Апробация результатов исследования. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: международная молодежная научная конференция «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем» (г. Томск, ИПМКН ТГУ, 2020-2021); всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (г. Москва, РУДН, 2020-2024); международная

научная конференция «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (г. Москва, РУДН, 2022, 2024).

По материалам исследований в Федеральной службе исполнительной власти по интеллектуальной собственности «Роспатент» зарегистрированы программы ЭВМ «Расчет энергопотребления устройства в режиме DRX для различных типов трафика», «Расчёт вероятности потери сессии при совместном обслуживании в миллиметровом и терагерцевом диапазонах частот с учетом блокировок прямой видимости».

Автор является победителем конкурсного отбора 2025 года на назначение стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов (свидетельство SPN.2025.05537), победителем конкурсного отбора программы РУДН «Аспирантура полного дня» (2024-2025), приглашенным участником Конгресса молодых ученых на федеральной территории «Сириус» (2025).

Реализация результатов работы. Результаты работы являются частью исследований по проекту РНФ № 23–79-10084 «Математические модели и практические алгоритмы повышения энергоэффективности в гетерогенных миллиметровых и терагерцевых сетях пятого и шестого поколения (5G/6G)» (2023-2026).

Публикации. Результаты исследования представлены в 7 публикациях, в том числе в 3 работах, опубликованных в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus. По теме диссертации автором получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи — повышению энергоэффективности пользовательских устройств в высокочастотных сетях подвижной связи «Новое радио». При анализе основных показателей энергоэффективности пользовательского устройства — спектральной эффективности радиоканала между пользовательским устройством и базовой станцией, энергопотребления, энергоэффективности и времени работы батареи пользовательского устройства — применен подход, заключающийся в оценке длительности интервалов нахождения пользовательского устройства в состояниях, различающихся

энергопотреблением. Исследование строится на последовательном усложнении моделей: от анализа базовых факторов, влияющих на качество связи, при построении базовых моделей в главе 1 до разработки комплексных методов оценки энергосберегающих технологий в главах 2 и 3, при этом ключевым результатом каждой главы является аналитическое выражение для функции распределения длительности непрерывного соединения пользовательского устройства с сетью, а также распределения интервалов, из которых складывается эта случайная величина.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, а также указаны научная новизна, теоретическая и практическая ценность данной работы.

В главе 1 детально анализируются особенности функционирования сетей 5G в миллиметровом диапазоне FR2, включая критическое влияние микро- и макромобильности пользователей на стабильность соединения. Для количественной оценки этих эффектов разработаны аналитические модели: алгоритм оценки параметра экспоненциального распределения, аппроксимирующего интервал до наступления события макромобильности, и метод расчета длительности интервала до наступления события макромобильности с учетом случайного расположения блокаторов сигнала.

Алгоритм 1 вычисления параметра λ_{T_A} экспоненциального распределения случайного времени T_A до события макромобильности пользовательского устройства.

Исходные данные: $\Delta x, \Delta y$ — средние скорости смещения пользовательского устройства по оси Ox и оси Oy [м/с], $\Delta \phi, \Delta \theta$ — средние угловые скорости изменения угла места и угла азимута направления луча антенны пользовательского устройства [рад/с], l — 3D расстояние между фазовыми центрами антенн пользовательского устройства и базовой станции [м], N_A и N_U — число антенных элементов на базовой станции и на пользовательском устройстве.

ШАГ 1. Вычисление углов α для базовой станции и β для пользовательского устройства при вершине конической модели антенны

$$\alpha = \frac{102 \pi}{180 N_A} [\text{рад}], \quad \beta = \frac{102 \pi}{180 N_U} [\text{рад}], \quad (1)$$

ШАГ 2. Вычисление граничных условий $M_{XY}, M_{\Phi\Theta}$ рассогласования лучей антенн пользовательского устройства и базовой станции

$$M_{XY} = l \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = l \tan\left(\frac{102\pi}{180 N_A}\right), \quad M_{\Phi\Theta} = \frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} = \frac{102\pi}{360} \left(\frac{1}{N_U} + \frac{1}{N_A}\right). \quad (2)$$

ШАГ 3. Вычисление параметров $\mu_x, \mu_y, \mu_\phi, \mu_\theta$ и $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\phi, \sigma_\theta$ логнормальных распределений, аппроксимирующих процесс микромобильности,

$$\mu_x = \log\left(\frac{2M_{XY}}{\Delta x}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \quad \mu_y = \log\left(\frac{2M_{XY}}{\Delta y}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sqrt{\log\left(\frac{5}{3}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right)}; \quad (4)$$

$$\mu_\phi = \log\left(\frac{2M_{\Phi\Theta}}{\Delta\phi}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \quad \mu_\theta = \log\left(\frac{2M_{\Phi\Theta}}{\Delta\theta}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \quad (5)$$

$$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sqrt{\log\left(\frac{5}{3}\right)}. \quad (6)$$

ШАГ 4. Численное вычисление параметра λ_{T_A} экспоненциального распределения по формуле $\lambda_{T_A} = \left[\int_0^\infty t f_{T_A}(t) dt\right]^{-1}$, где $f_{T_A}(t)$ зависит от $\mu_x, \mu_y, \mu_\phi, \mu_\theta$ и $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\phi, \sigma_\theta$:

$$\begin{aligned} f_{T_A}(t) = & \frac{\frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}}}{\sigma_x} \left[2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)\right]}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta}\right)\right]^{-1}} + \\ & + \frac{\frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}}{\sigma_y} \left[2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x}\right)\right]}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta}\right)\right]^{-1}} + \\ & + \frac{\frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_\phi)^2}{2\sigma_\phi^2}}}{\sigma_\phi} \left[2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta}\right)\right]}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)\right]^{-1}} + \end{aligned} \quad (7)$$

$$+ \frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_\theta)^2}{2\sigma_\theta^2}}}{\sigma_\theta} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi} \right) \right] \\ \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right]^{-1},$$

где $\operatorname{erfc}(\cdot)$ — дополнительная функция ошибок.

Утверждение 1. Пусть h_A — высота базовой станции, h_U — высота пользовательского устройства, h_B — высота цилиндрического блокатора, r_B — радиус цилиндрического блокатора, v_B — скорость блокатора, λ_B — параметр точечного пуассоновского процесса в \mathfrak{R}^2 расположения блокаторов в зоне покрытия базовой станции.

Тогда в модели макромобильности длительность интервала T_L до события макромобильности вследствие появления на линии прямой видимости между базовой станцией и пользовательским устройством, находящемся от нее на расстоянии x , подвижных цилиндрических блокаторов может быть оценена с помощью экспоненциального распределения с параметром

$$\gamma(x) = \frac{e^{2r_B\alpha(x)/v_B} - 1}{e^{2r_B\alpha(x)/v_B}}, \quad (8)$$

где

$$\alpha(x) = \frac{2}{5} \lambda_B v_B \left[4r_B + 2x \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U} \right] \quad (9)$$

— интенсивность появления блокаторов между пользовательским устройством и базовой станцией.

На основе предложенных моделей в главе 1 строится базовая ЦМ, описывающая состояния пользовательского устройства при применении функции мультисвязности. Численный анализ, проведенный с использованием разработанного алгоритма, позволяет сделать важный практический вывод: эффективная степень мультисвязности не может быть фиксированной величиной, а должна динамически адаптироваться к характеристикам окружающей среды — плотности блокаторов и скорости макромобильности. Результаты главы показывают, что при высокой плотности блокаторов мультисвязность становится критически важной, однако степени мультисвязности $N \geq 3$ даже при высокой макромобильности становятся малопривлекательными из-за резкого падения энергоэффективности. Поэтому в главе 2 построена модель для анализа энергоэффективности пользовательского

устройства для степени мультисвязности $N = 2$, т.н. «двойном подключении» (dual connectivity) к базовой станции, а в главе 3 построена модель для сравнительного анализа энергоэффективности пользовательского устройства при применении нескольких механизмов энергосбережения.

В главе 2 для анализа энергоэффективности при двойном подключении разработана трехуровневая модель в виде поглощающей ЦМ 1) $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{dual} = \{1, \dots, N_{app}\}$ с инфинитезимальной матрицей $\mathbf{U}^{dual} = [u_{ij}^{dual}]_{i,j \in \mathbb{Z}^{dual}}$ для моделирования переключения между приложениями (уровень I), 2) ЦМ $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$, $m=1,2,3$, $\mathbb{X}^{(1)} = \{MN, SN, MM, SM, O, EoS\}$, $\mathbb{X}^{(2)} = \{MN, SN, MM, SM, EoS\}$, $\mathbb{X}^{(3)} = \{MN, SN, MM, EoS\}$ с инфинитезимальной матрицей $[q_{ij}^{(m)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(m)}}$ для моделирования взаимодействия с основной и резервной базовыми станциями (уровень II) и 3) ЦМ $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual} = \{0, 1, \dots, 7\}$ с инфинитезимальной матрицей $\mathbf{W}^{dual} = [w_{ij}^{dual}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{dual}}$ для моделирования работы механизма «прерывистый прием» (уровень III). Такой подход позволяет провести сравнительный анализ трех ключевых сценариев двойного подключения: внутрисетевого с резервной станцией того же миллиметрового диапазона (FR2/FR2), внутрисетевого с переходом на более низкий диапазон (FR2/FR1) и межсетевого с подключением к станции LTE (FR2/LTE).

Утверждение 2. Пусть для трехуровневой ЦМ величина $P_{C,L2,i}^{dual}$ – энергопотребление в состояниях ЦМ уровня II $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$, $T_{A,k}$ и T_{Idle} – длительности интервалов работы на пользовательском устройстве приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{app}\}$, и интервала переключения между приложениями.

Тогда энергопотребление P_C^{dual} для сценария двойного подключения может быть вычислено по формуле

$$P_C^{dual} = n_{L1,Idle}^{dual} e_{Idle} T_{Idle} + \sum_{k=1}^{N_{app}} n_{L1,k}^{dual} T_{A,k} \sum_{i \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}} n_{L2,i}^{(m)} P_{C,L2,i}^{dual}, m = 1,2,3, \quad (10)$$

$$k \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{Idle, End\} = \{1, \dots, N_{app}\}, \mathbb{X}^{(1)} \setminus \{EoS\} = \{MN, SN, MM, SM, O\},$$

$$\mathbb{X}^{(2)} \setminus \{EoS\} = \{MN, SN, MM, SM\}, \quad \mathbb{X}^{(3)} \setminus \{EoS\} = \{MN, SN, MM\}.$$

Анализ влияния плотности блокаторов на энергопотребление при потреблении контента (рис. 1(a)) показывает, что наилучшая

производительность у сценариев одиночного подключения «только LTE» и «только NR FR1», причём «только LTE» потребляет примерно втрое меньше энергии. Все варианты двойного подключения характеризуются более высоким энергопотреблением. При высокой плотности блокаторов наихудшая производительность у сценария «FR2/FR1», наименьшее потребление — у «FR2/LTE». Объяснение в том, что с ростом плотности блокаторов переключение на резервную базовую станцию происходит чаще, активнее используются резервная базовая станция NR FR1 или LTE, при этом энергопотребление LTE значительно ниже, чем NR FR1.

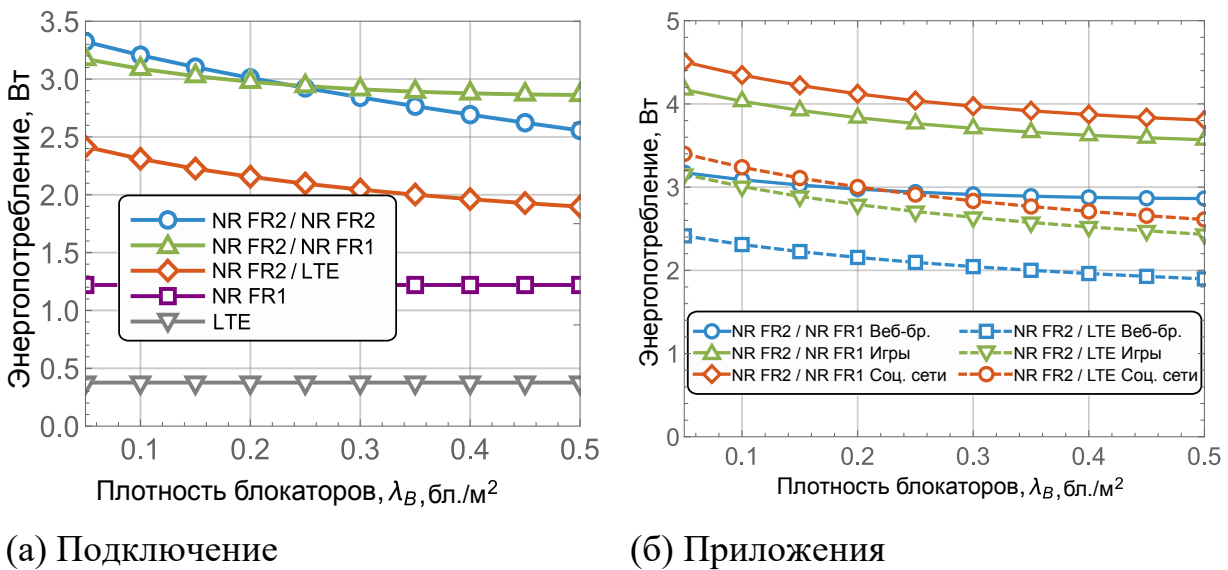


Рис. 1. Энергопотребление в зависимости от плотности блокаторов

В сценарии двойного подключения «FR2/FR1» повышение плотности блокаторов приводит к более частым перебоям в работе основной базовой станции FR2, что требует дополнительных энергозатрат для процедур управления лучом. В сценарии «FR2/LTE» наблюдаемая тенденция определяется более низким энергопотреблением интерфейса LTE по сравнению с NR FR1 в условиях высокой плотности сети. Абсолютная разница значений энергопотребления между «FR2/FR2» и «FR2/LTE» при $\lambda_B = 0,5$ бл./м² достигает 1,5 Вт, что должно негативно сказаться на времени работы батареи. Однако в сценарии «FR2/FR1» это компенсируется более высокими суммарными скоростями передачи данных, достигаемыми в mmWave. В отличие от сценариев «FR2/FR2» и «FR2/LTE», обеспечивающих надежное соединение за счет резервирования базовой станции LTE, одновременная блокировка обеих базовых станций в сценарии «FR2/FR2» с mmWave приводит к перебоям в работе ПУ.

На рис. 1(а) для сценария «FR2/LTE» наблюдается незначительное снижение энергопотребления с ростом плотности блокаторов из-за того, что резервная базовая станция для технологии LTE без ресурсоемкого отслеживания луча потребляет меньше энергии, чем для технологии NR, и при росте плотности блокаторов пользовательское устройство больше времени проводит в подключении к LTE, снижая общее энергопотребление. Качественное поведение кривых энергопотребления для сценариев двойного подключения «FR2/FR1» и «FR2/LTE» в зависимости от плотности блокаторов на рис. 1(б) у приложений «веб-серфинг», «игры» и «социальные сети» одинаково. Наименьшее энергопотребление характерно для потребления контента: преобладает веб-серфинг с длительными паузами и минимальной скоростью микромобильности 0,1°/с. Игры и социальные сети потребляют примерно на 1 Вт больше из-за более высокой нагрузки и скоростей микромобильности. Разница между ними (~0,2 Вт) определяется сочетанием трафика и микромобильности: в играх доминируют мобильные приложения со скоростью 0,3°/с, в соцсетях — со скоростью 0,2°/с, но с более высокими требованиями к скорости передачи данных. Эта разница может возрасти при использовании приложений с более высокой микромобильностью.

Результаты численного моделирования демонстрируют, что выбор эффективной стратегии двойного подключения должен определяться типом приложения и требованиями к качеству обслуживания. Для приложений, чувствительных к перебоям, но с невысокими требованиями к скорости передачи, рекомендуется межсетевая мультисвязность FR2/LTE с резервной базовой станцией LTE; для интенсивного трафика, допускающего кратковременные разрывы, предпочтительнее внутрисетевая мультисвязность FR2/FR2 с резервной базовой станцией FR2.

В главе 3 на примере класса устройств с урезанной функциональностью RedCap сделан переход от моделирования микро- и макромобильности экспоненциальными распределениями к диффузионным моделям для описания перемещения пользователя, что позволяет детально учесть динамику изменения отношения сигнал-шум и спектральной эффективности во времени. Для анализа комбинированного применения механизмов энергосбережения — «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксации управления радиоресурсами» — построена двухуровневая модель в виде поглощающей ЦМ 1) ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq$

$0\} \in \mathbb{Z}^{RRM} = \{\text{Full RRM, RRM – rel., Full RRM – MM, RRM – rel. – MM, Blocked}\}$ с инфинитезимальной матрицей $\mathbf{U}^{RRM} = [u_{ij}^{RRM}]_{i,j \in \mathbb{Z}^{RRM}}$ для моделирования переключения пользовательского устройства между режимами релаксации управления радиоресурсами (уровень I), 2) ЦМ $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM} = \{0, 1, \dots, 10\}$ с инфинитезимальной матрицей $\mathbf{W}^{RRM} = [w_{ij}^{RRM}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{RRM}}$. для моделирования работы механизма «прерывистый прием» с учетом «сигнал пробуждения» и «релаксации управления радиоресурсами» (уровень II).

Утверждение 3. Пусть для двухуровневой ЦМ величина $S_E(t)$ — спектральная эффективность в момент времени t , $f_C^{RRM}(t)$ – плотность распределения длительности непрерывного соединения пользовательского устройства с сетью, $n_{L2,i}^{RRM}$ — среднее число посещений состояния i ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$, W — ширина полосы частот.

Тогда средняя спектральная эффективность радиоканала между пользовательским устройством и базовой станцией может быть оценена с использованием теоремы Шеннона-Хартли:

$$E[S_E^{RRM}] = \int_0^{\infty} \log_2(1 + S_E(t)) f_C^{RRM}(t) dt. \quad (11)$$

Энергопотребление P_C^{RRM} и средняя энергоэффективность $E[P_E^{RRM}]$ пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью имеют вид

$$P_C^{RRM} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}} n_{L2,i}^{RRM} e_i; \quad E[P_E^{RRM}] = \frac{W \cdot E[S_E^{RRM}]}{P_C^{RRM}} \quad (12)$$

Среднее время работы батареи пользовательского устройства имеет вид

$$E[B_T^{RRM}] = \frac{B_C B_V}{P_C^{RRM}}. \quad (13)$$

На рис. 2 показаны энергоэффективность и время работы батареи механизмов энергосбережения для приложений расширенной виртуальной реальности и веб-серфинга в зависимости от скорости рыскания и тангажа, характеризующих микромобильность. Параметры: $\lambda_B=0,1$ ед./м², антенная решетка ПУ 4×4, $x_0=20$ м. Как и ожидалось, высокая скорость микромобильности снижает энергоэффективность — потери достигают 30% из-за рассогласования лучей и последующих энергозатратных процедур управления лучом.

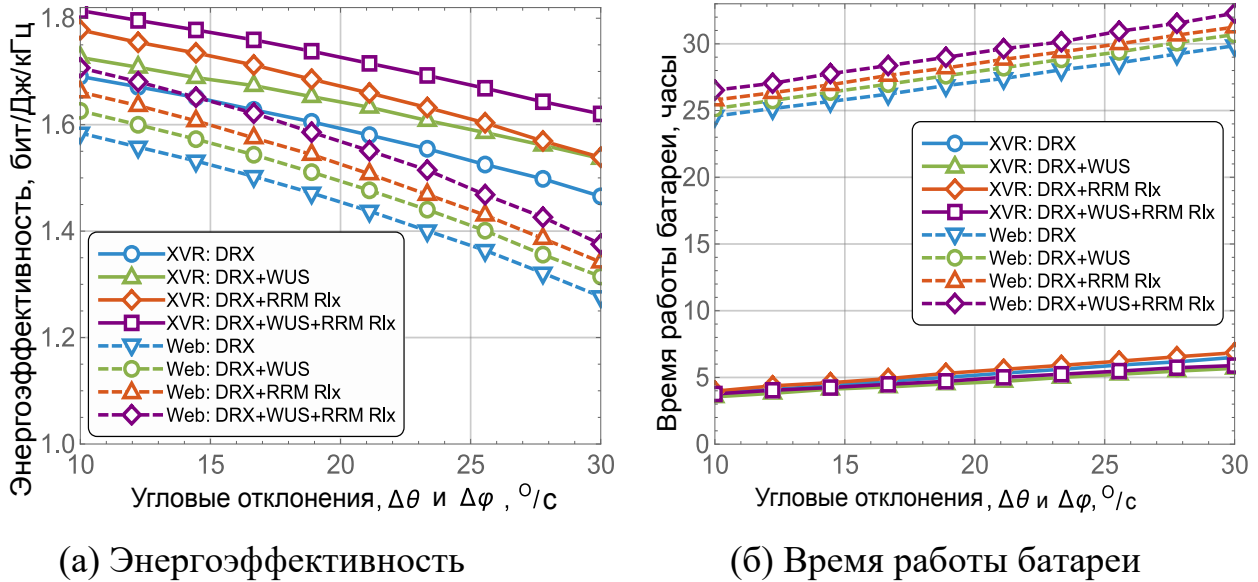


Рис. 2. Энергоэффективность и время работы батареи в зависимости от микромобильности для разных схем энергосбережения

Тип трафика существенно влияет на рассматриваемые метрики. Энергоэффективность веб-серфинга при использовании схемы «прерывистый прием»+«сигнал пробуждения»+«релаксации управления радиоресурсами» оказывается хуже, чем простейшей схемы «прерывистый прием» для приложения расширенной виртуальной реальности, так как метрика учитывает не только время сна, но и объем переданных данных. Таким образом, даже с учетом длительных периодов сна, приложения расширенной виртуальной реальности демонстрируют более высокую энергоэффективность за счет высокой скорости передачи данных для этого типа трафика, препятствующей переходу пользовательского устройства в режим сна. Механизм «сигнал пробуждения» улучшает показатели для обоих типов трафика, однако схема «прерывистый прием»+«релаксации управления ресурсами» эффективнее, особенно в условиях низкой микромобильности. Наилучшая производительность наблюдается при совместном использовании всех механизмов в схеме «прерывистый прием»+«сигнал пробуждения»+«релаксации управления радиоресурсами». Прирост от использования всех механизмов приблизительно одинаков для обоих рассмотренных приложений и составляет до 1 бит/Дж/кГц. Результаты по времени работы батареи, представленные на Рис. 2(б), согласуются с тенденцией, наблюдаемой для энергоэффективности. Таким образом, для требовательных к скорости приложений реального времени, таких как

«расширенная виртуальная реальность», для оптимальной работы достаточно базового механизма энергосбережения «прерывистый прием», тогда как для приложений с низкой скоростью передачи данных критически важна полная комбинация всех трех механизмов.

В **заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В **заключении** диссертационной работы сформулируем основные результаты исследования.

1. Алгоритм оценки параметра экспоненциального распределения случайной длительности интервала до наступления события микромобильности и метод расчета длительности интервала до наступления события макромобильности с функцией мультисвязности, позволившие построить базовые модели состояний пользовательского устройства при применении механизма «прерывистый прием» и мультисвязности и получить аналитическое выражение для функции распределения длительности непрерывного соединения пользовательского устройства с сетью, а также функций распределения интервалов, из которых складывается эта случайная величина.
2. Модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде трехуровневой ЦМ для анализа показателей энергоэффективности пользовательского устройства – спектральной эффективности, энергопотребления, энергоэффективности и времени работы батареи – при двойном подключении в сценариях внутрисетевой и межсетевой мультисвязности.
3. Модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде двухуровневой ЦМ для оценки показателей энергоэффективности пользовательского устройства с урезанной функциональностью при комбинировании механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы в изданиях, входящих в базы данных Scopus/Web of Science

1. *Ostrikova, D., Beschastnyi, V., Moltchanov, D., Golos, E., Gaidamaka, Y., Ivanov, I., Koucheryavy, Ye., and Samouylov, K.* Battery Lifetime and Power Consumption in 5G Systems with Intra- and Inter-RAT Dual-Connectivity // *IEEE Transactions on Mobile Computing.* – 2024. 23(5). P. 5511-5526.
2. *Ostrikova, D.; Golos, E.; Beschastnyi, V.; Machnev, E.; Gaidamaka, Y.; Samouylov, K.* Dynamic SNR, Spectral Efficiency, and Rate Characterization in 5G/6G mmWave/sub-THz Systems with Macro- and Micro-Mobilities // *Future Internet.* – 2024. 16. P. 240.
3. *Острикова Д. Ю., Голос Е. С., Бесчастный В. А., Мачнев Е. А., Шоргин В. С., Гайдамака Ю. В.* Метод оценки характеристик систем 5G/6G «новое радио» с учетом макро- и микромобильности пользователей // *Информатика и её применение.* – 2024. – Т.18, №2. – С. 32–39.

Работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК

4. *Бесчастный В.А., Голос Е.С., Острикова Д.Ю., Мачнев Е.А., Шоргин В.С., Гайдамака Ю.В.* Анализ совместного использования стратегий энергосбережения для устройств 5G с ограниченным функционалом // *Системы и средства информатики.* – 2023. – Т. 33. №4. С. 149 – 161.

Патенты

5. *Аксёнова А.В., Голос Е.С., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Гайдамака Ю.В.* Расчет энергопотребления устройства в режиме DRX для различных типов трафика // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2022619091 / 19.05.2022.
6. *Конюхов Р.И., Голос Е.С., Дараселия А.В., Сопин Э.С., Самуилов К.Е.* Расчёт вероятности потери сессии при совместном обслуживании в миллиметровом и терагерцевом диапазонах частот с учетом блокировок прямой видимости // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2022660566 / 06.06.2022.

Конференции

7. *Аксёнова А.В., Острикова Д.Ю., Бесчастный В.А., Голос Е.С., Конюхов Р.И., Гайдамака Ю.В.* Модель энергопотребления устройства в режиме прерывистого приёма DRX в сети 5G NR // В сб.: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 18–22 апреля 2022 г; 2022: С. 85-91.
8. *Голос Е.С., Мачнев Е.А., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Мокров Е.В.* К анализу энергоэффективности и срока службы батареи смартфона в терагерцевых сетях // В сб.: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 17–21 апреля 2023 г; 2023: С. 59-62.
9. *Голос Е.С.* Анализ влияния расположения пользователей в соте сети 5G/6G на спектральную эффективность // В сб.: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. – 2024. – С. 121-128.

Голос Елизавета Сергеевна (Россия)

**ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ МИКРО- И
МАКРОМОБИЛЬНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
СВЯЗИ «НОВОЕ РАДИО»**

В диссертации разработаны вероятностные модели микро- и макромобильности для сетей 5G «Новое радио» миллиметрового диапазона. Предложены методы аппроксимации распределений интервалов до рассогласования лучей антенн и блокировки прямой видимости. Разработана трехуровневая модель в виде поглощающих цепей Маркова для анализа энергопотребления, энергоэффективности и времени работы батареи при двойном подключении (FR2/FR2, FR2/FR1, FR2/LTE). Разработана двухуровневая модель для анализа комбинированного применения механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами» для устройств RedCap 5G «Новое радио». Сформулированы рекомендации по выбору сценария двойного подключения и комбинации механизмов энергосбережения.

Golos Elizaveta (Russia)

**DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC MODELS OF MICRO- AND
MACROMOBILITY FOR ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF NEW
RADIO MOBILE COMMUNICATION NETWORKS**

The thesis develops probabilistic models of micro- and macromobility for 5G New Radio millimeter-wave networks. Methods are proposed for approximating the distributions of beam misalignment and line-of-sight blockage intervals. A three-level absorbing Markov chain model is developed for analyzing power consumption, energy efficiency, and battery lifetime under dual connectivity scenarios (FR2/FR2, FR2/FR1, FR2/LTE). A two-level model is developed for analyzing the combined use of Discontinuous Reception, Wake-Up Signal, and Radio Resource Management Relaxation energy-saving mechanisms for RedCap 5G NR devices. Recommendations are formulated for selecting dual connectivity scenarios and combinations of energy-saving mechanisms.