

**РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ
ИМЕНИ ПАТРИСА ЛУМУМБЫ**

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор
Гайдамака Юлия Васильевна

Москва – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	- 3 -
ГЛАВА 1. Влияние микро- и макромобильности на энергоэффективность сетей 5G.....	- 18 -
1.1 Моделирование особенностей сетей 5G NR.....	- 21 -
1.2 Базовые модели состояний пользовательского устройства в виде цепи Маркова.....	- 46 -
1.3 Применение базовых моделей к решению задачи мультисвязности и численный анализ.....	- 55 -
ГЛАВА 2. Модель двойного подключения как реализации мультисвязности.....	- 66 -
2.1 Системная модель двойного подключения.....	- 67 -
2.2 Модель состояний пользовательского устройства для анализа сценариев двойного подключения.....	- 70 -
2.3 Численный анализ характеристик сценариев двойного подключения.....	- 81 -
ГЛАВА 3. Энергоэффективность пользовательских устройств в сетях 5G «Промышленный интернет вещей»	- 91 -
3.1 Системная модель подключения пользовательского устройства с урезанной функциональностью.....	- 92 -
3.2 Модель состояний пользовательского устройства для анализа механизмов энергосбережения.....	- 107 -
3.3 Численный анализ характеристик механизмов энергосбережения.....	- 112 -
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	- 121 -
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	- 122 -
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	- 125 -
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	- 134 -
Приложение 1. Переходные вероятности ЦМ DRX.....	- 150 -
Приложение 2. Переходные вероятности ЦМ dual.....	- 152 -
Приложение 3. Переходные вероятности ЦМ RRM.....	- 154 -
Приложение 4. Доказательство леммы 3.2.....	- 157 -
Приложение 5. Оценка точности модели при комбинировании трех механизмов энергосбережения.....	- 159 -

ВВЕДЕНИЕ

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 (ПУ) и базовой станцией (БС). 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 ПУ по сравнению с сетями 4G. Учитывая, что питание ПУ осуществляется от аккумуляторной батареи ограниченной емкости, проблема энергоэффективности выходит на первый план, непосредственно влияя на время автономной работы ПУ.

Таким образом, для поддержания требуемого качества обслуживания в сетях 5G NR 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 прерывистого приема (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 комплексных математических моделей, позволяющих оценить энергоэффективность ПУ в различных сценариях и выработать практические рекомендации по применению технологий энергосбережения в высокочастотных беспроводных мобильных сетях 5G.

Степень разработанности темы.

Для анализа показателей энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио» построены математические модели, основанные на теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, в частности ЦМ в дискретном времени с дискретным пространством состояний, 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. [3, 57], Горцев А.М. [12], Зейфман А.И.[13], Кучерявый А.Е. [17], Моисеев А.Н. [96], Моисеева С.П.[97], Молчанов Д.А. [100, 101], Назаров А.А.[19, 20], Наумов В.А. [103, 104], Печинкин А.В. [5, 63], Разумчик Р.В.[23], Рыков В.В. [24], Самуйлов К.Е.[106, 107], Семенова О.В. [26, 27], Степанов М.С. [18, 132], Степанов С.Н. [28, 29], Цитович И.И.[25, 30], L.M. Correia [138], E. Gelenbe [75], V.B. Iversen [81], F.P. Kelly [82], L. Kleinrock [85], K.W. Ross [120] и др., включая учёных, получивших выдающиеся результаты в исследовании качества предоставления услуг в сетях связи – Вишневский В.М. [6, 7], Гольдштейн Б.С. [10], Парамонов А.И.[11, 14, 55], Пшеничников А.П. [16, 22], Сопин Э.С. [58, 59], в частности, в области сетей подвижной связи 5G – Андреев С.Д. [76, 122], Бегишев В.О. [60], Кочеткова И.А. [68, 94], Кучерявый Е.А. [110, 134], Молчанов Д.А. [98, 99], Хакимов А.А.

[93], Хоров Е.М [136], а также зарубежных исследователей –J.G. Andrews [65], M. Dohler [66], J. M. Jornet [111, 112], T. Kim [84], G. R. MacCartney[92], T. S. Rappaport [91], S. Rostami [121].

Цель диссертационной работы: разработка математических моделей в виде цепей Маркова для анализа и расчета показателей эффективности механизмов макро- и микромобильности, 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 прерывистого приема и мультисвязности.
2. Разработать математическую модель состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде поглощающей цепи Маркова, позволяющей оценить энергопотребление, энергоэффективность и время работы батареи пользовательского устройства при применении механизма прерывистого приема 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 цепи Маркова, 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 базовых моделей микро- и макромобильности разработанные комбинированные модели в виде многоуровневых цепей Маркова позволили провести анализ 4 показателей энергоэффективности ПУ (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 5G NR, а именно микро- и макромобильности, внутрисетевой и межсетевой 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 цепи Маркова выполнен сравнительный анализ энергоэффективности ПУ с функцией мультисвязности при одновременном учете микро- и макромобильности в трех сценариях двойного подключения, который ранее для указанных сценариев внутрисетевой и межсетевой мультисвязности не проводился.
3. На основе разработанной комбинированной модели состояний пользовательского устройства в течение непрерывного соединения с сетью в виде двухуровневой цепи Маркова выполнен сравнительный анализ энергоэффективности ПУ при применении механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами» а также их комбинаций, который ранее для не проводился.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии математического аппарата для анализа сетей подвижной связи 5G

NR: предложены оригинальные методы аппроксимации распределений случайных интервалов микро- и макромобильности, разработаны многоуровневые модели в виде поглощающих цепей Маркова, позволяющие учитывать взаимное влияние характера трафика приложений, функции мультисвязности и механизмов энергосбережения (DRX, WUS, RRM-relaxation), что расширяет теоретическую базу исследований в области телетрафика и стохастического моделирования систем связи.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением полученных результатов в исследования по гранту РФФИ № 23-79-10084, регистрацией программ для ЭВМ, а также 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 макромобильности, 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 частности ЦМ в дискретном времени с дискретным пространством состояний, теории массового обслуживания, стохастической геометрии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Длительность интервала до наступления события макромобильности 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 цепи Маркова 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 цепи Маркова 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 тем, что теория построена на известных методах теории массового обслуживания, марковских случайных процессов и стохастической геометрии, используемых при доказательствах утверждений; идея базируется на анализе и 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 Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на 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» [2], «Расчёт вероятности потери сессии при совместном обслуживании в миллиметровом и терагерцевом диапазонах частот с учетом блокировок прямой видимости» [15].

Автор является победителем конкурсного отбора 2025 года на назначение стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов по приоритетному направлению стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Повышение уровня связанности территории Российской Федерации путем создания интеллектуальных транспортных, энергетических и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики (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 гг.).

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.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с паспортом специальности 1.2.3. «Теоретическая информатика, кибернетика» и соответствует п. 9 Математическая теория исследования операций (физико-математические науки), а именно формализация исследуемой системы как объекта исследования операций в части описания фрагмента сети подвижной связи «Новое радио» в виде совокупности взаимодействующих элементов (пользовательские устройства, базовые станции, блокаторы) и в части описания протекающих в фрагменте сети процессов установления, поддержания и разъединения соединений между ПУ и БС (описание режимов протокола управления радиоресурсами, функции мультисвязности и работы механизмов энергосбережения с помощью цепей Маркова в дискретном времени, описание процесса поступления пакетов данных с помощью Марковского процесса в непрерывном времени, описание микромобильности ПУ с помощью вероятностной модели, описание макромобильности блокатора с помощью системы массового обслуживания, описание макромобильности пользователя с помощью диффузионного процесса). Сравнительный анализ альтернатив, как ключевой элемент исследования операций, реализован при выборе степени мультисвязности (раздел 1.3), выборе сценария двойного подключения (глава 2), выборе комбинации механизмов энергосбережения (глава 3). Критериями при анализе выступают показатели эффективности,

которые четко определены в разделе 1.1 в соответствии с стандартизирующими документами международных стандартизирующих организаций.

Личный вклад. Модель состояния ПУ при мультисвязности с двойным подключением в виде ЦМ уровня III для анализа энергопотребления ПУ в главе 2 и модель состояния ПУ с учетом 3-х механизмов энергосбережения в виде ЦМ уровня II для анализа энергопотребления ПУ в главе 3 построены автором. Численные эксперименты, представленные в диссертации, проведены с помощью программных средств, разработанных автором диссертации.

Объем и структура работы. Текст диссертации включает в себя введение, основную часть из трех глав и заключение. Диссертация включает в себя список литературы из 139 библиографических ссылок. Работа изложена на 149 страницах текста, содержит 30 рисунков, 13 таблиц и 5 приложений на 10 страницах.

Краткое изложение диссертации.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи — повышению энергоэффективности пользовательских устройств в высокочастотных сетях подвижной связи «Новое радио». При анализе основных показателей энергоэффективности ПУ — спектральной эффективности радиоканала между ПУ и БС, энергопотребления ПУ, энергоэффективности ПУ и времени работы батареи ПУ — 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 ПУ с сетью,

а также распределения интервалов, из которых складывается эта случайная величина.

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 параметров макромобильности и метод расчета длительности интервала до наступления событий макромобильности с учетом случайного расположения блокаторов сигнала.

Алгоритм 1.1. В модели макромобильности параметр λ_{T_A} экспоненциального распределения случайного времени T_A до события макромобильности ПУ может быть вычислен по следующему алгоритму.

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

ШАГ 1. Вычисление углов α для БС и β при вершине в конической модели

$$\text{антенны } \alpha = \frac{102 \pi}{180 N_A} [\text{рад}], \beta = \frac{102 \pi}{180 N_U} [\text{рад}].$$

ШАГ 2. Вычисление граничных условий $M_{XY}, M_{\Phi\Theta}$ рассогласования лучей антенн ПУ и БС

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

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 макромобильности,

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

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

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

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

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 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\phi, \sigma_\theta$:

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

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

Утверждение 1.1 В модели макромобильности длительность интервала T_L до события макромобильности вследствие появления на линии прямой видимости между БС на высоте h_A и ПУ на высоте h_U , находящемся от нее на расстоянии x , подвижных цилиндрических блокаторов с высотой h_B и радиусом r_B , движущихся с скоростью v_B , расположение которых описывается

точечным пуассоновским процессом в \mathfrak{R}^2 с параметром λ_B , может быть оценена с помощью экспоненциального распределения с параметром $\gamma(x)$, имеющим вид

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

где

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

- интенсивность появления блокаторов прямой видимости между ПУ и БС.

На основе предложенных моделей в главе строится базовая цепь Маркова, 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 микромобильности. Результаты главы показывают, что при высокой плотности блокаторов мультисвязность становится критически важной, однако степени мультисвязности $N \geq 3$ даже при высокой микромобильности становятся малопривлекательными из-за резкого падения энергоэффективности. Поэтому в главе 2 построена модель для анализа энергоэффективности ПУ для степени мультисвязности $N = 2$, т.н. «двойном подключении» (dual connectivity) к БС, а в главе 3 построена модель для сравнительного анализа энергоэффективности ПУ при применении нескольких механизмов энергосбережения.

В главе 2 для анализа энергоэффективности при двойном подключении разработана трехуровневая модель в виде поглощающих цепей Маркова, где каждый уровень описывает свою группу процессов: переключение между приложениями (уровень I), взаимодействие с основной и резервной базовыми станциями (уровень II) и работу механизма прерывистого приема DRX

(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 2.3. Энергопотребление P_C^{dual} для сценария двойного подключения может быть оценено по формуле

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

$$m = 1, 2, 3,$$

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

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

Здесь $n_{L1,j}^{dual}$ и $n_{L2,j}^{(m)}$ - среднее число посещений состояния j ЦМ уровня I $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{dual}$ по формуле (2.3) и ЦМ уровня II $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$ по формуле (2.9), $P_{C,L2,i}^{dual}$ - энергопотребление в состояниях ЦМ уровня II $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$ по формулам (2.19)-(2.21), $T_{A,k}$ и T_{Idle} - длительности интервалов работы на ПУ приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$, и интервала переключения между приложениями.

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 БС LTE; для интенсивного трафика, допускающего кратковременные разрывы, предпочтительнее внутрисетевая мультисвязность FR2/FR2 с резервной БС FR2.

Глава 3 посвящена исследованию энергоэффективности класса устройств с урезанной функциональностью (RedCap), предназначенных для

промышленного интернета вещей. В этой части работы развиваются модели, предложенные в предыдущих главах, переходя от аппроксимации 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 — прерывистого приема (DRX), сигнала пробуждения (WUS) и релаксации управления радиоресурсами (RRM-relaxation) — построена двухуровневая цепь Маркова.

Утверждение 3.2. Показатели энергоэффективности ПУ при применении механизма «релаксация управления радиоресурсами» и механизмов энергосбережения «прерывистый прием» и «сигнал пробуждения» могут быть оценены следующим образом.

Средняя спектральная эффективность радиоканала между ПУ и БС может быть оценена с использованием теоремы Шеннона-Хартли [127]:

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

где $S_E(t)$ — спектральная эффективность в момент времени t по формуле (3.25), $f_C^{RRM}(t)$ — плотность распределения длительности непрерывного соединения ПУ с сетью по формуле (3.30).

Энергопотребление ПУ в течение непрерывного соединения ПУ с сетью имеет вид

$$P_C^{RRM} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}} n_{L2,i}^{RRM} e_i,$$

где $n_{L2,i}^{RRM}$ — среднее число посещений ЦМ уровня $\Pi \{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$ по формуле (3.30).

Средняя энергоэффективность ПУ в течение непрерывного соединения ПУ с сетью имеет вид

$$E[P_E^{RRM}] = \frac{W \cdot E[S_E^{RRM}]}{P_C^{RRM}},$$

где W — ширины полосы частот.

Среднее время работы батареи ПУ имеет вид

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

Сравнительный анализ четырех схем энергосбережения для двух типов приложений (X-VR и веб-серфинг) позволил сделать практически значимые выводы. В частности, для требовательных к скорости приложений реального времени, таких как X-VR, для оптимальной работы достаточно базового механизма DRX, тогда как для приложений с низкой скоростью передачи данных критически важна полная комбинация всех трех механизмов.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

ГЛАВА 1.

Влияние микро- и макромобильности на энергоэффективность сетей 5G

Работа по стандартизации беспроводных систем «Новое радио» (New Radio, NR) сетей пятого поколения (5G) — далее для краткости 5G NR — окончательно завершена. Следует отметить, что по сравнению с технологией LTE (Long Term Evolution, стандарт «Долгосрочное развитие сетей связи»), работающей на дециметровых волнах в диапазоне частот от 450 МГц до 2,7 ГГц, диапазон радиочастот NR был расширен первоначально до 6,425 ГГц [33], а впоследствии — до 7,125 ГГц [34] в средних частотах, что обозначается как диапазон FR1, также был добавлен высокочастотный диапазон миллиметровых длин волн (mmWave) выше 24 ГГц — диапазон FR2. Этот последний частотный диапазон позволяет системам 5G реализовать свой полный потенциал с точки зрения скорости и пропускной способности сети, а также обеспечивает работу ранее недоступных приложений, таких как расширенная реальность, автоматизация промышленности и т.д. [69]. Однако из-за особенностей распространения миллиметровых волн [116] связь между пользовательским устройством (ПУ) и базовой станцией (БС) может осуществляться только в условиях прямой видимости (Line-of-Sight, LoS) между устройствами, поэтому зона покрытия базовой станции 5G mmWave NR обычно ограничена. Как следствие, в городских условиях mmWave БС должны располагаться на расстоянии приблизительно 200–400 м друг от друга, что в 5–10 раз плотнее, чем в существующих городских сетях предыдущих поколений [65], [77].

Помимо требований к сверхплотному размещению инфраструктуры, системы mmWave характеризуются относительно низкой энергоэффективностью. Заметим, что задача экономии энергии в первую очередь касается повышения энергоэффективности ПУ, емкость аккумуляторной батареи, и следовательно, время автономной работы которого ограничены. Вопросы энергоэффективности впервые упомянуты в 3GPP Release 10 [50] и [51]. Решение этой проблемы изучалось в рамках

спецификаций 3GPP Release 18 [38] и [41] в контексте исследований по 5G-Advanced [32], где выдвинут ряд рекомендаций, например, учет аспекта энергоэффективности при проектировании всех интерфейсов стандарта 3GPP, отмена отправки регулярных обновлений местоположения для пользовательского оборудования, которое заведомо является статичным, например, торговых автоматов.

Для mmWave характерны проблемы распространения радиоволн. По закону Фрииса потери в свободном пространстве растут с квадратом частоты [56], что вызывает высокое затухание сигнала не только при прохождении через препятствия, но и в эфире атмосферного поглощения, особенно около 60 ГГц [117]. Для компенсации этих эффектов и создания устойчивого покрытия необходимы фазированные антенные решетки (ФАР) на базовых станциях и пользовательских устройствах (ПУ). ФАР формируют узкие направленные лучи, концентрирующие энергию сигнала и компенсирующие высокие потери в mmWave-диапазоне. Однако, в системах с узкими лучами даже небольшие объекты – люди, автомобили, элементы инфраструктуры, листва – могут блокировать сигнал, а при нарушении прямой видимости между ПУ и БС происходит временная полная потеря связи [79].

Для услуг с непрерывной передачей данных 3GPP предложил механизмы мультисвязности (multiconnectivity) [40], предполагающие одновременное соединение с несколькими mmWave БС — одной опорной и одной или несколькими резервными. Это позволяет ПУ при нарушении прямой видимости с опорной БС из-за блокатора сократить время хэндовера: переключение на резервную БС происходит быстрее, чем ожидание исчезновения блокатора. Однако мультисвязность увеличивает задержку и энергозатраты на обмен служебными сообщениями для поддержания соединений с резервными БС. В разделе 1.3 и главе 2 диссертации проведён анализ качества услуги при мультисвязности с точки зрения задержки и энергоэффективности.

Для повышения энергоэффективности 3GPP расширил протокол управления радиоресурсами (Radio Resource Control, RRC), определённый для 4G (UMTS в TS 25.331 [43], LTE в TS 36.331 [37]), дополнительным режимом ожидания RRC-Inactive (TS 38.331 [42]) для 5G. Также ETSI, ITU и NGMN предложили механизмы энергосбережения: прерывистый приём (Discontinuous Reception, DRX) [42], сигнал пробуждения (Wake-Up Signal, WUS) [46], [48], а для ПУ с урезанной функциональностью (Reduced Capability, RedCap/NR-Light) [44] — релаксация управления радиоресурсами (Radio Resource Management Relaxation, RRM-relaxation) [44], [88]. Идея механизмов — снижение энергопотребления в периоды отсутствия активности или неподвижности ПУ за счёт перехода на более редкий обмен сигнальными сообщениями с БС. Исследование этих механизмов с точки зрения задержки и энергоэффективности выполнено в главе 3 диссертации.

В разделе 1.1 определены вспомогательные модели: коническая модель диаграммы направленности, модель распространения Urban-Micro (UMi) «улица-каньон» между ПУ и БС, модель трафика 3GPP FTP Model 3, системная модель соты mmWave NR, а также модели микро- и макромобильности. В разделе 1.2 в виде цепей Маркова построены две базовые модели состояний ПУ при передаче трафика – мультисвязности и механизма DRX для RRC-соединения (непрерывного соединения ПУ с сетью), а в разделе 1.3 решена задача определения эффективной степени мультисвязности ПУ (числа одновременно подключенных опорной и резервных БС) по задержке и энергоэффективности. Базовые модели главы 1 использованы в главе 2 при построении модели двойного подключения в виде трёхуровневой цепи Маркова для анализа энергоэффективности сетей 5G и в главе 3 при анализе комбинации механизмов энергосбережения с помощью двухуровневой цепи Маркова для разработки рекомендаций по их применению.

1.1 Моделирование особенностей сетей 5G NR

Для антенн ПУ и БС использована коническая модель диаграммы направленности [110], [129] с постоянным коэффициентом усиления в главном лепестке; вершина конуса соответствует фазовому центру. Аналогично [64], для круговой конической модели, симметричной относительно главной оси, ширина луча по уровню половинной мощности (half-power beamwidth, HPBW) аппроксимируется планарным углом

$$\theta_{2D} = 2|\theta_m - \theta_{3db}^+|, \quad (1.1)$$

где θ_{2D} – 2D-ширина луча (угол раствора конуса в круговой конической 3D-модели), θ_m – направление максимума мощности массива (ось конической модели луча), а θ_{3db}^{\pm} - верхняя и нижняя точки угла с потерей мощности в 3дБ. Значения параметров рассчитываются следующим образом: $\theta_m = \arccos(-1/\pi)$, $\theta_{3db}^{\pm} = \arccos(\pm 2,782/N\pi)$, где N - число антенных элементов планарной ФАР. Для эллиптической конической 3D-модели антенны, использованной в главе 3, число антенных элементов ФАР по горизонтали N_H и по вертикали N_V могут не совпадать, т.е. $\theta_{2D,H} \neq \theta_{2D,V}$. Круговая коническая 3D-модель антенны, использованная в главах 1 и 2 при $N_H=N_V$ и $\theta_{2D,H} = \theta_{2D,V}$, является частным случаем эллиптической конической 3D-модели, использованной в главе 3.

Средний коэффициент усиления антенны по главному лепестку вычисляется следующим образом [64]:

$$G = \frac{1}{\theta_{3db}^+ - \theta_{3db}^-} \int_{\theta_{3db}^-}^{\theta_{3db}^+} \frac{\sin\left(\frac{N_{(\cdot)}\pi \cos(x)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cos(x)}{2}\right)} dx, \quad (1.2)$$

где $N_{(\cdot)} = N_H N_V$.

Модель «улица-каньон» (Urban-Micro, UMi), для моделирования среды распространения радиосигнала использована во всех главах диссертационной работы в соответствии с подходом [61]. Согласно [47, 61] потеря мощности (затухание) радиосигнала определяется следующим образом:

$$L_{dB}(y) = 32,4 + \zeta 10 \log(y) + 20 \log f_c, \quad (1.3)$$

где f_c - несущая частота [ГГц], y – расстояние между фазовыми центрами антенн ПУ и БС (т.н. «3D расстояние») [м], ζ – коэффициент затухания радиосигнала при распространении в среде, причем $\zeta = 2,1$ в условиях прямой видимости LoS, $\zeta = 3,19$ и в условиях отсутствия прямой видимости (Non-LoS, NLoS) [47].

Значение SINR отношения сигнал-шум на принимающем устройстве определяется следующим выражением:

$$S(y) = P_T G_A G_U \left[\frac{A y^{-\zeta}}{N_0 + I_M} \right], \quad (1.4)$$

где P_T – мощность передающего устройства, G_A и G_U – коэффициенты усиления сигнала на антеннах БС и ПУ, N_0 – шум, I_M – интерференция. Здесь потеря мощности (затухание) принимаемого радиосигнала $A y^{-\zeta}$ на 3D-расстоянии y выражены в линейном масштабе, при этом коэффициент $A = 10^{2 \log_{10} f_c + 3,24}$ получен переводом $L_{dB}(y)$ из децибел в формуле (1.3), а интерференция I_M зависит от плотности λ_A размещения БС и может быть определена с помощью моделей точечного пуассоновского процесса в \mathbb{R}^2 , предложенных в [86], [110].

Во всех главах для исследования механизмов энергосбережения рассмотрена модель трафика 3GPP FTP Model 3 [36], типичная для потоковых сервисов: веб-серфинг, передача файлов, видео, голосовые вызовы. Например, приложения расширенной виртуальной реальности XR/VR/AR (extended reality/virtual reality/ augmented reality) предполагают чередование загрузки данных от БС на ПУ и пауз для их обработки пользователем. Аналогичный пульсирующий характер трафика наблюдается при веб-серфинге (web-browsing): короткий всплеск загрузки контента сменяется паузой на просмотр. Для пульсирующего трафика «on/standby», где передача данных прерывается паузами, ПУ следует переводить в режим сниженного контроля радиоинтерфейса для экономии заряда батареи. Трафик моделируется экспоненциально распределенными интервалами активной передачи данных

(«on» mode) и пауз («standby» mode) с параметрами λ_0 и λ_S , при этом за активный интервал передается заданный объем данных (2 Мбайта, 0,5 Мбайта). Дополнительно, при анализе приложений промышленного интернета вещей в главе 3 использована модель трафика X-VR/VR/AR из 3GPP Release 17 [45], учитывающая высокую скорость передачи данных и микромобильность ПУ.

При исследовании показателей качества услуг системами mmWave NR следует учитывать рассогласование лучей антенн ПУ и опорной БС вследствие микромобильности [112], [129], [134]. Микромобильность — быстрые повороты и встряхивания ПУ в руке пользователя — нарушает выравнивание осей лучей ФАР, вызывая регулярные разрывы соединения даже при прямой видимости между ПУ и БС. Для восстановления выравнивания лучей антенн в NR предусмотрена процедура поиска луча (beamsearch), входящая в управление лучом и радиоканалом и регулярно запускаемая между ПУ и БС, что увеличивает задержку передачи данных и энергозатраты. При всестороннем поиске одна сторона канала переводится во всенаправленный режим, а другая перебирает конфигурации ФАР для нахождения оптимальной, после чего устройства меняются ролями. Построенная в главе 1 модель микромобильности исследует влияние процедуры управления лучом на задержку передачи данных и энергоэффективность. Она моделирует случайное время до нарушения соединения ПУ и БС из-за микромобильности.

Для описания микромобильности используется модель из [111], формализующая изменение расположения и ориентации ПУ в системе координат $0xuz$ с 6 степенями свободы (Six degrees of freedom, 6DoF). При моделировании предполагается, что смещение ПУ по оси $0z$ несущественно и не влияет на ориентацию луча антенны. Ориентация ПУ задается углами Эйлера [31], учитываются только тангаж (pitch) и рыскание (yaw), так как крен (roll) не влияет на направление луча. Тангаж — вращение вокруг поперечной оси, изменяющее угол элевации; рыскание — вращение вокруг вертикальной оси, изменяющее азимут; крен — вращение вокруг продольной оси.

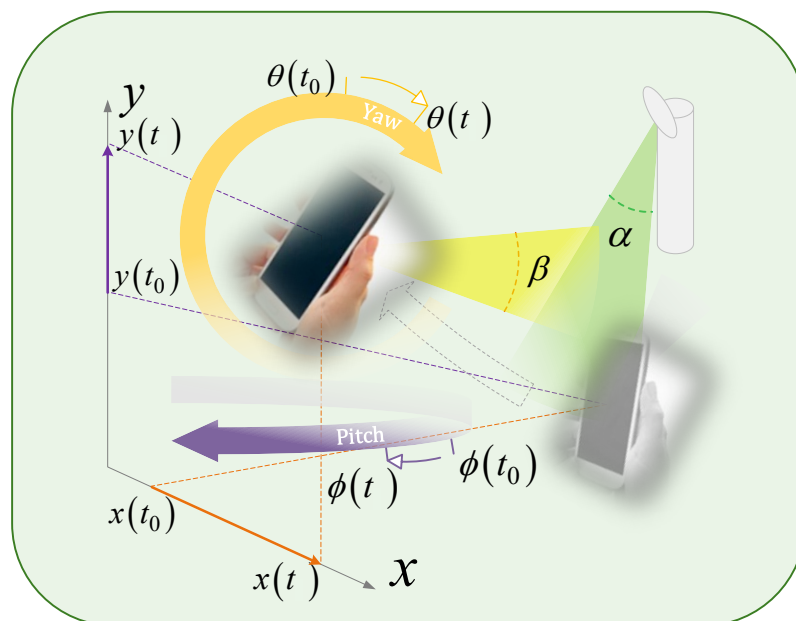


Рис. 1.1. Параметры модели микромобильности:
pitch - тангаж, *yaw* - рыскание

На рис. 1.1. параметры модели микромобильности проиллюстрированы на примере изменения положения ПУ в трехмерном пространстве $0xyz$ за интервал времени $[t_0, t]$: изменение угла места при тангаже от $\phi(t_0)$ до $\phi(t)$ и угла азимута от $\theta(t_0)$ до $\theta(t)$, а также смещение ПУ вправо-влево от $x(t_0)$ до $x(t)$ и вверх-вниз от $y(t_0)$ до $y(t)$. Угловые отклонения $\phi = |\phi(t_0) - \phi(t)|$ угла места при тангаже, $\theta = |\theta(t_0) - \theta(t)|$ угла азимута при рысканье, а также высоты ПУ и БС.

Модель микромобильности предназначена для моделирования случайного времени T_A от окончания процедуры управления лучом и начала передачи данных до события микромобильности –рассогласования лучей антенн ПУ и БС, требующего повторной процедуры выравнивания. Модель строится в предположении о конической 3D-модели антенн обоих устройств, фиксированном 3D-расстоянии l (между фазовыми центрами антенн) и заданной конфигурации ФАР. Параметрами модели микромобильности являются декартовы (Δx и Δy) и угловые ($\Delta \phi$ и $\Delta \theta$) скорости изменения расположения и ориентации ПУ, вид которых на примере Δx определен следующим образом:

$$\Delta x = \frac{x(t) - x(t_0)}{t - t_0}. \quad (1.5)$$

Согласно [111] функция $f_{T_A}(t)$ плотности вероятности случайного времени T_A до рассогласования лучей антенн ПУ и БС из-за микромобильности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} f_{T_A}(t) = & \frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right]}{\sigma_x} \quad (1.6) \\ & \frac{1}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta} \right) \right]^{-1}} \\ & + \\ & \frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) \right]}{\sigma_y} \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta} \right) \right]^{-1}} + \\ & \frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_\phi)^2}{2\sigma_\phi^2}} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta} \right) \right]}{\sigma_\phi} \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right]^{-1}} + \\ & \frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_\theta)^2}{2\sigma_\theta^2}} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi} \right) \right]}{\sigma_\theta} \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2\pi t} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right]^{-1}}, \end{aligned}$$

где $\operatorname{erfc}(\cdot)$ - дополнительная функция ошибок, $\mu(\cdot)$ и $\sigma(\cdot)$ - параметры моделирующих смещения и вращения ПУ логнормальных распределений, которые можно оценить на основе эмпирических данных. Заметим, что формула (1.6) представляет собой комбинацию нескольких логнормальных $\operatorname{LogN}(\mu, \sigma^2)$ распределений с плотностью вероятности вида

$$f_T(t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\log(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.7)$$

параметры (μ, σ) которых служат ограничениями при определении случайной длительности интервала до наступления события микромобильности в Алгоритме 1.1 ниже.

В диссертационной работе для аппроксимации случайного времени T_A до наступления события микромобильности использовано экспоненциальное распределение

$$f_{\tilde{T}_A}(t) = \lambda_{T_A} e^{-\lambda_{T_A} t}, \quad (1.8)$$

при этом предложен Алгоритм 1.1 расчета параметра λ_{T_A} . Для аналитического вычисления формул в диссертационном исследовании разработано программное обеспечение [2] на базе Wolfram Mathematica [137].

Алгоритм 1.1. В модели микромобильности параметр λ_{T_A} экспоненциального распределения (1.8) случайного времени T_A до события микромобильности ПУ может быть вычислен по следующему алгоритму.

Исходные данные:

$\Delta x, \Delta y$ — средние скорости смещения ПУ по оси Ox и оси Oy [м/с]

$\Delta\phi, \Delta\theta$ — средние угловые скорости изменения угла места и угла азимута направления луча антенны ПУ [рад/с]

l — 3D расстояние между фазовыми центрами антенн ПУ и БС [м]

N_A — число антенных элементов на БС

N_U — число антенных элементов на ПУ

ШАГ 1. Вычисление угла при вершине в конической модели антенны

1.1. Угловая ширина луча антенны БС: $\alpha = \frac{102 \pi}{180 N_A}$ [рад] (1.9)

1.2. Угловая ширина луча антенны ПУ: $\beta = \frac{102 \pi}{180 N_U}$ [рад] (1.10)

ШАГ 2. Вычисление граничных условий $M_{XY}, M_{\Phi\Theta}$ рассогласования лучей

2.1 Максимальное смещение по оси Oy фазового центра антенны приемника (вершины конической модели антенны) относительно фазового центра

антенны передатчика, при котором сохраняется соединение между ПУ и опорной БС:

$$M_{XY} = l \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = l \tan\left(\frac{102 \pi}{180 N_A}\right). \quad (1.11)$$

2.2 Максимальное угловое отклонение оси главного лепестка антенны передатчика (оси конической модели антенны) от направления между фазовыми центрами антенн прием-передающих устройств (между вершинами конусов в моделях антенн), при котором сохраняется соединение между ПУ и опорной БС:

$$M_{\Phi\Theta} = \frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} = \frac{102\pi}{360} \left(\frac{1}{N_U} + \frac{1}{N_A}\right). \quad (1.12)$$

ШАГ 3. Вычисление параметров логнормальных распределений вида (1.7), аппроксимирующих процесс микромобильности

3.1 Параметры логнормальных распределений случайной величины смещения по оси Ox и случайной величины смещения по оси Oy :

$$\begin{aligned} \mu_x &= \log\left(\frac{2M_{XY}}{\Delta x}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \\ \mu_y &= \log\left(\frac{2M_{XY}}{\Delta y}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \\ \sigma_x &= \sigma_y = \sqrt{\log\left(\frac{5}{3}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right)}. \end{aligned}$$

3.2 Параметры логнормальных распределений случайных величин угловых отклонений главного лепестка антенны по двум осям – для угла места ϕ и для угла азимута θ :

$$\begin{aligned} \mu_\phi &= \log\left(\frac{2M_{\Phi\Theta}}{\Delta\phi}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \\ \mu_\theta &= \log\left(\frac{2M_{\Phi\Theta}}{\Delta\theta}\right) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{5}{3}\right); \\ \sigma_\phi &= \sigma_\theta = \sqrt{\log\left(\frac{5}{3}\right)}. \end{aligned}$$

ШАГ 4. Численное вычисление параметра λ_{T_A} экспоненциального распределения (1.8):

$$\lambda_{T_A} = \left[\int_0^{\infty} t f_{T_A}(t) dt \right]^{-1}, \quad (1.13)$$

где $f_{T_A}(t)$ имеет вид (1.6), параметры $f_{T_A}(t)$ определены на шаге 3, ограничения — на шаге 2.

При исследовании показателей качества услуг mmWave NR следует учитывать также эффекты макромобильности, характерные для систем предыдущих поколений. Макромобильность — перемещение пользователей в зоне покрытия, вызывающее один или несколько эффектов: во-первых, меняется уровень сигнала на ПУ из-за изменения расстояния до опорной БС и рассогласования лучей антенн; во-вторых, возможна потеря связи, если на линии прямой видимости появляется блокатор. Подход к исследованию макромобильности взят из [9, 21].

Для учета изменения среды распространения при блокировке прямой видимости между ПУ и БС можно использовать подход сетей предыдущих поколений с всенаправленными антеннами: учет потери мощности сигнала коэффициентом затухания (например, ζ в (1.3) для $L_{dB}(y)$ и в (1.4) для SINR). Однако для сетей mmWave NR с направленными ФАР следует учитывать, что блокировка прямой видимости происходит часто, поскольку блокатором узкого луча может стать даже небольшой объект — человек, автомобиль, элементы инфраструктуры, листва [71]. При блокировке соединение между ПУ и БС нарушается, требуя процедуры управления радиоканалом для восстановления связи с опорной БС или хэндовера на новую БС.

Построенная далее *модель макромобильности* описывает появление блокаторов на линии прямой видимости между ПУ и БС. Она моделирует случайную длительность интервалов видимости и блокировки из-за макромобильности. Достаточно учитывать относительное положение устройств, поэтому модель макромобильности из главы 1 используется для

анализа качества услуг mmWave NR: в главе 2 — при неподвижном ПУ и перемещающихся блокаторах, в главе 3 — при перемещении ПУ и неподвижных блокаторах.

На рис. 1.2 схематически показан сценарий блокировки линии прямой видимости между фазовыми центрами антенн ПУ и БС на высотах h_U и h_A ($h_U < h_A$), блокатором, моделируемым цилиндром радиуса r_B . Высота блокатора h_B для модели главы 2 соответствует среднему росту человека ($h_U < h_B < h_A$), для модели главы 3 — высоте блокирующего радиосигнал оборудования ($h_U < h_A < h_B$). Серым цветом обозначена зона блокировки — «тень» блокатора, при попадании в которую хотя бы одного блокатора соединение между ПУ и БС отсутствует.

Далее построена модель макромобильности с неподвижным ПУ и с подвижными блокаторами, перемещающимися в соответствии с моделью случайного направления (random direction mobility, RDM) [102]: блокатор выбирает направление равномерно в $(0, 2\pi)$ и перемещается с постоянной скоростью v_B м / с в течение экспоненциально распределенного времени с параметром μ . Модель построена для соединения ПУ с произвольной i -й БС, $i = 1, \dots, N$, для применения в главе 2 при анализе мультисвязности ПУ.

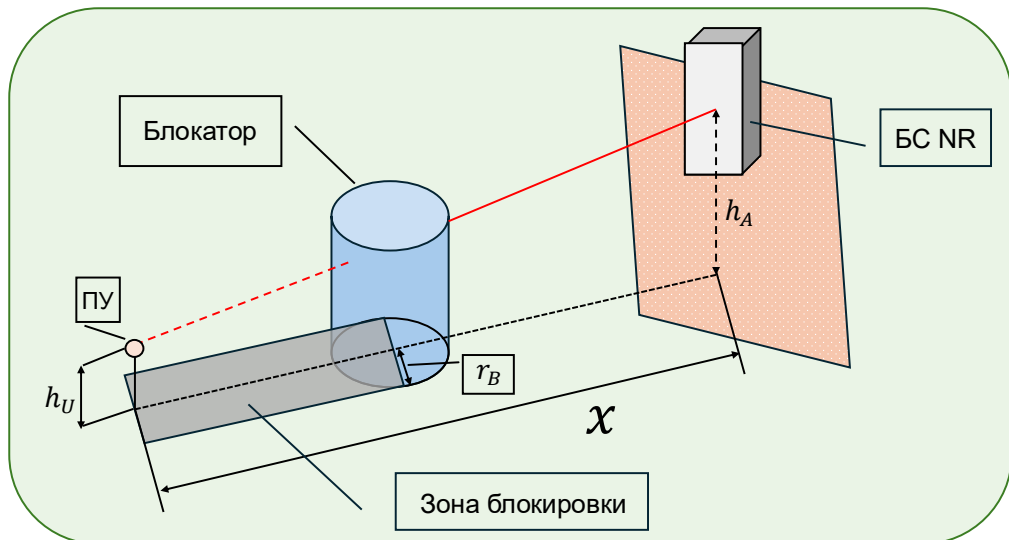


Рис. 1.2. Схема модели макромобильности

Утверждение 1.1. В модели макромобильности длительность интервала T_L до события макромобильности вследствие появления на линии прямой

видимости между i -й БС на высоте h_A и ПУ на высоте h_U , находящемся от нее на расстоянии x , подвижных цилиндрических блокаторов с высотой h_B и радиусом r_B , движущихся с скоростью v_B , расположение которых описывается точечным пуассоновским процессом (Poisson Point Process, PPP) в \mathfrak{R}^2 с параметром λ_B , может быть оценена с помощью экспоненциального распределения с параметром $\gamma(x)$, имеющим вид

$$\gamma(x) = \frac{e^{2r_B\alpha(x)/v_B} - 1}{e^{2r_B\alpha(x)/v_B}}, \quad (1.14)$$

где

$$\alpha(x) = \frac{2}{5} \lambda_B v_B \left[4r_B + 2x \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U} \right] \quad (1.15)$$

- интенсивность появления блокаторов прямой видимости между ПУ и БС.

Доказательство. Воспользуемся подходом [74], согласно которому интенсивность $\alpha(x)$ появления блокаторов на линии прямой видимости между ПУ и БС имеет вид (1.15), где λ_B – параметр точечного пуассоновского процесса расположения блокаторов в \mathfrak{R}^2 , $4r_B + 2x \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U}$ – периметр зоны блокировки.

Средние значения случайных длительностей интервала $\Psi_B(x)$ блокировки прямой видимости одним блокатором и интервала $\Phi_B(x)$ прямой видимости между БС и ПУ могут быть оценены следующим образом:

$$E[\Psi_B(x)] = \frac{e^{2r_B\alpha(x)/v_B} - 1}{\alpha(x)}, \quad E[\Phi_B(x)] = \frac{1}{\alpha(x)}, \quad (1.16)$$

где $E[\cdot]$ – оператор математического ожидания, $2r_B/v_B$ – среднее время пересечения блокатором зоны блокировки.

Вероятность $\gamma(x)$ нахождения блокатора в зоне блокировки прямой видимости между БС и ПУ, расположенном от нее на 2D расстоянии x , имеет вид

$$\gamma(x) = \frac{E[\Psi_B(x)]}{E[\Psi_B(x)] + E[\Phi_B(x)]}. \quad (1.17)$$

Это позволяет аппроксимировать плотность распределения длительности интервала прямой видимости до события макромобильности следующим образом:

$$f_{T_L}^{base}(t) = \gamma(x)e^{-\gamma(x)t}, \quad t \geq 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1.18)$$

В соответствии с [73] зона блокировки ПУ — область, где на линии прямой видимости между ПУ и БС находится хотя бы один блокатор, вызывающий затухание сигнала на 20 дБ [91, 92]. Следуя [74], длительность блокировки ПУ на случайном 2D расстоянии x от БС оценивается с помощью системы массового обслуживания (СМО) $M/GI/\infty$ [28], [57] с входящим пуассоновским потоком интенсивности $\alpha(x)$ и средним временем обслуживания $E[\Psi_B(x)]$, равным среднему времени нахождения блокатора в зоне блокировки. Тогда период блокировки моделируется периодом занятости $M/GI/\infty$ и имеет среднюю длительность

$$\sigma(x) = \alpha(x)E[\Psi_B(x)] = e^{2r_B\alpha(x)/v_B} - 1, \quad (1.19)$$

что позволяет аппроксимировать плотность распределения длительности интервала блокировки прямой видимости между ПУ и БС следующим образом:

$$f_{T_{NL}}^{base}(t) = \sigma(x)^{-1}e^{-\sigma(x)^{-1}t}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1.20)$$

Утверждение доказано.

Отметим, что в диапазоне ниже 6 ГГц (Sub-6 GHz) при блокировке прямой видимости снижение мощности принимаемого сигнала незначительно (2–4 дБ), и им можно пренебречь [124].

В главе 3 модель макромобильности уточнена моделью одномерного диффузионного процесса при перемещении ПУ и неподвижных блокаторах.

Полученные плотности $f_{T_A}(t)$ в модели микромобильности, $f_{T_L}^{base}(t)$ и $f_{T_{NL}}^{base}(t)$ в модели макромобильности лежат в основе метода анализа плотности $f_{C,i}^{dual}(t)$ длительности непрерывного соединения ПУ с i -й БС в главе 2 и плотности $f_C^{RRM}(t)$ длительности непрерывного соединения ПУ с сетью в главе 3. Ключевое для диссертационной работы понятие длительности

RRC-соединения, как непрерывного соединения ПУ с сетью, введено в следующем подразделе.

Протокол Radio Resource Control (RRC)

В архитектуре 4G LTE взаимодействие между ПУ и БС осуществляется протоколом управления радиоресурсами (Radio Resource Control, RRC) [42]), отвечающим за передачу системной информации, установление, поддержание и разрыв RRC-соединения, включая пейджинг и создание сигнальных радиопотоков и радиопотоков. К этой области относятся процедуры внутрисетевого и межсетевого хэндовера (inter- и intra-RAT, Radio Access Technology), исследованные в главе 2 и настройка измерений (measurement), включая активацию их периодов, исследованных в главе 3. Согласно протоколу RRC ПУ постоянно мониторит нисходящий канал управления PDCCH (Physical Downlink Control Channel) для отслеживания индикатора управления нисходящего канала (Downlink Control Indicator, DCI) — информации о наличии данных для ПУ и БС, частотных ресурсах, кодировании и времени ожидания. Далее для определенности рассматривается передача данных в нисходящем направлении от БС к ПУ, что не нарушает общности моделей, так как подход позволяет построить аналогичные модели для сигнальной информации по каналу PUCCH (Physical Uplink Control Channel) и передачи данных по восходящему каналу PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) со стороны ПУ.

Также ПУ постоянно измеряет RSRP (Received Signal Reference Power) — мощность принимаемого опорного сигнала (Reference Signal, RS) от БС и RSRQ (Received Signal Reference Quality) — качество принятого сигнала в дБ (dB). RSRQ представляет собой отношение мощности полезного сигнала к уровню помех и общей мощности в полосе пропускания (чем ближе значение к нулю, тем выше качество), а SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) отношения сигнал-шум (ОСШ) — безразмерное отношение мощности полезного сигнала к сумме мощностей помех от устройств на тех же или близких частотах и теплового шума (чем выше значение, тем выше качество).

Выбор опорной БС при первичном подключения ПУ к сети производится на основании параметра RSRP, а процедура хэндовера — RSRP и RSRQ.

При потере связи между ПУ и БС вследствие микромобильности для восстановления выравнивания лучей достаточно выполнить поиск луча. При потере связи из-за макромобильности процедура управления радиоканалом включает выбор БС и поиск луча — синхронизацию со всеми доступными БС (обнаружение блока сигнала синхронизации (Synchronization Signal Block, SSB) с RSRP выше порога), выбор БС с максимальным RSRP в качестве опорной БС, и управление лучом для выравнивания антенн ПУ и опорной БС.

Для оптимизации энергопотребления в LTE протокол RRC предусматривает два режима работы ПУ [42, 128] — режим пониженной активности RRC-Idle и подключенный режим RRC-Connected. ПУ переходит в RRC-Idle при первичном подключения к сети, отсутствии данных для передачи или отсутствии связи со всеми БС, при этом RRC-соединение разрывается. В RRC-Idle информация о последней опорной БС не хранится, поэтому вместо частого мониторинга PDСН проводится более редкий пейджинг для регистрации на доступных БС, что экономит энергию. В RRC-Connected, требующий максимального энергопотребления для полной функциональности связи, ПУ переходит при наличии данных для передачи. Однако переход из RRC-Idle в RRC-Connected требует энергозатратной процедуры управления радиоканалом, поэтому в 5G [42] появился третий режим — режим ожидания RRC-Inactive, показанный на рис. 1.3.

В режиме RRC-Inactive ПУ, как и в RRC-Idle, выполняет редкий пейджинг, но, в отличие от RRC-Idle, хранит информацию о последней опорной БС, поэтому при необходимости приема данных по PDСН быстрее восстанавливает связь, выполняя лишь последнюю часть энергозатратной процедуры управления радиоканалом — выравнивание лучей антенн ПУ и опорной БС.

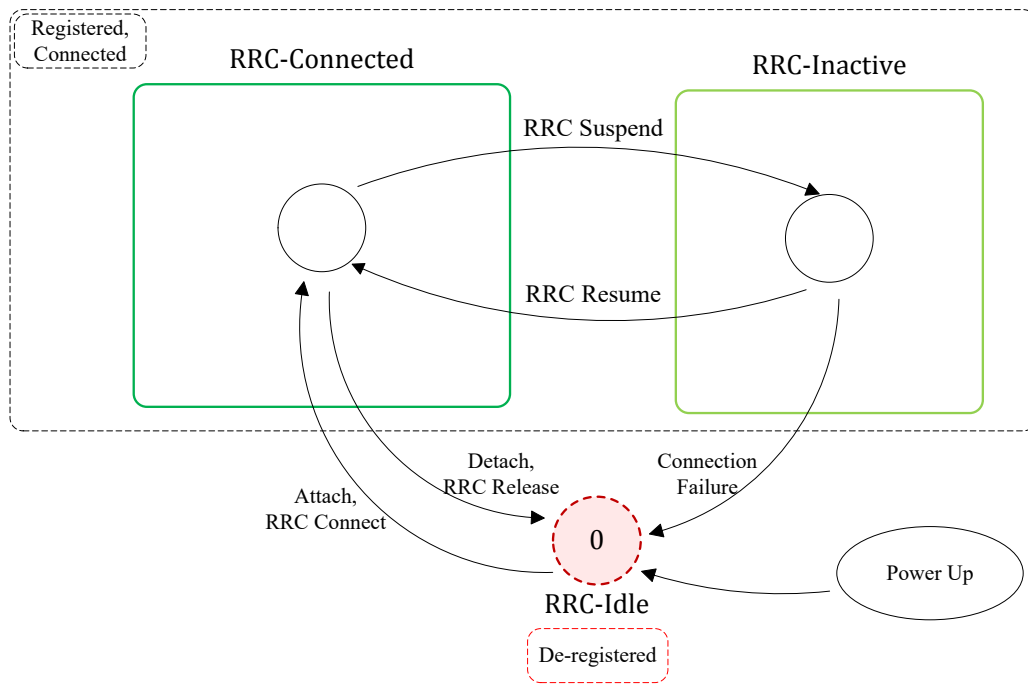


Рис. 1.3. Три режима соединения ПУ и БС для протокола управления радиоресурсами RRC в 5G – подключенный RRC-Connected, ожидания RRC-Inactive и пониженной активности RRC-Idle

Под длительностью RRC-соединения понимается интервал от начала процедуры управления радиоканалом при переходе из RRC-Idle в RRC-Connected до разрыва соединения. Разрыв может произойти из-за потери связи при микро- или макромобильности (главы 1, 2, 3), завершения сессии приложения (глава 2) или смены режима энергосбережения RRM (глава 3). Далее описаны механизмы энергосбережения, которые предложены научным сообществом [87, 89, 126, 128] и стандартизирующими организациями [39, 44, 53] для повышения энергоэффективности сети подвижной связи «Новое радио». Т.о. длительность непрерывного соединения ПУ с сетью соответствует длительности RRC-соединения, включающего выравнивание лучей из-за микро-мобильности и хэндоверы из-за макромобильности до разрыва RRC-соединения при потере связи со всеми доступными БС.

Механизм Discontinuous Reception (DRX).

Ключевая особенность современных приложений — прерывистый обмен данными ПУ–БС, где активная передача чередуется с паузами. Даже во время

пауз ПУ с полным функционалом NR продолжает мониторить DCI в PDCCH и измерять RSRP/RSRQ радиосоединения с БС. Постоянный контроль радиointерфейса при низкой нагрузке требует значительных энергозатрат, снижая энергоэффективность ПУ и время автономной работы.

Для решения указанной проблемы в 3GPP TS 36.321 [53] предложен, а в 3GPP TS 38.321 [39] усовершенствован метод прерывистого приема DRX, переводящий ПУ в состояние сна во время пауз в передаче данных. В состоянии сна ПУ реже мониторит канал PDCCH в соответствии с циклами DRX. Механизм регулирует смену режимов частого и редкого обмена сигнальными сообщениями с помощью таймеров «погружения в сон» и «пробуждения», требующих оптимизации для повышения энергоэффективности [89]. В NR механизм DRX включает настраиваемые параметры: таймер бездействия, длительности и число интервалов короткого и длинного сна до перехода в энергосберегающий режим, а также длительность цикла пейджинга DRX в этом режиме [87], [126], [128].

Как показано на рис. 1.4, по окончании приёма данных от БС на ПУ запускается таймер бездействия; если до его истечения DCI в PDCCH не укажет на наличие данных, запускается короткий цикл DRX, начинающийся с мониторинга PDCCH («On Duration»). При отсутствии данных за «On duration» следует интервал «короткого» сна без мониторинга PDCCH [88]. Если за заданное число коротких циклов DRX данные не обнаружены, запускается длинный цикл DRX из «On Duration» и «длинного» сна. При отсутствии данных за заданное число длинных циклов ПУ переходит в энергосберегающий режим (RRC-Inactive/Idle) с циклами пейджинга до обнаружения данных. Длительность цикла пейджинга превышает длинный цикл DRX. При обнаружении данных через DCI в «On Duration» или при пейджинге ПУ переходит в режим приёма по PDSCH.

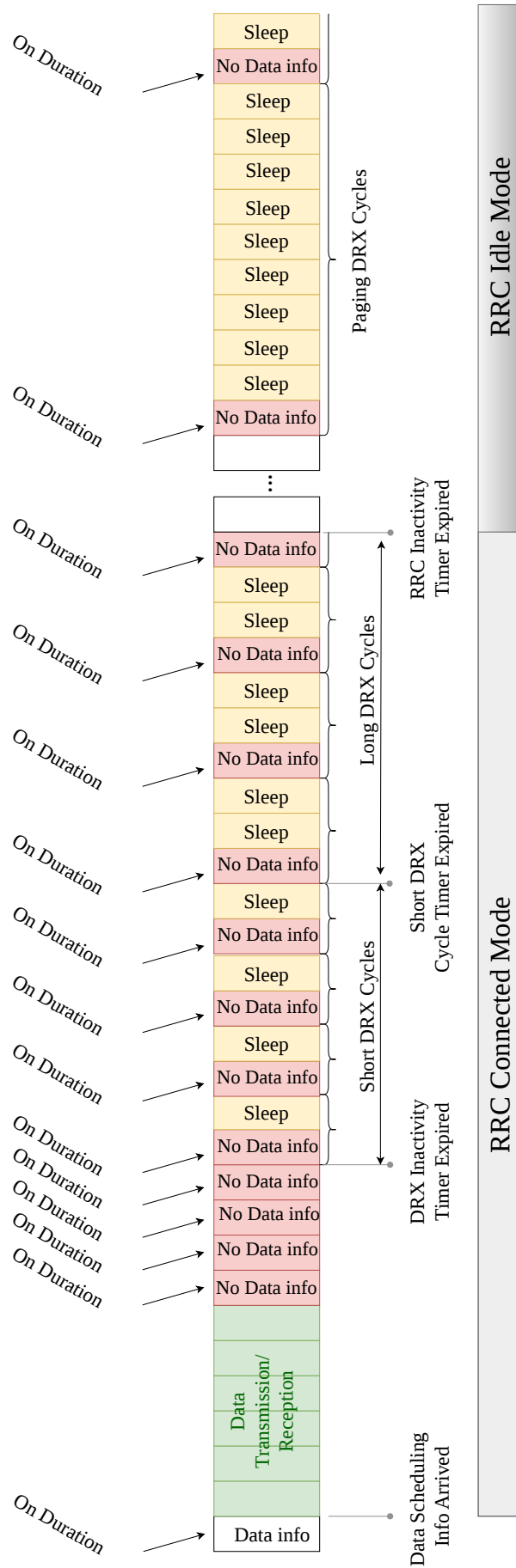


Рис. 1.4. Схема работы механизма прерывистого приема DRX

Для обеспечения качества обслуживания (QoS, Quality of Service) настройка параметров DRX (таймера бездействия, длительностей и числа интервалов короткого и длинного сна, длительности цикла пейджинга) требует баланса между энергосбережением и задержкой: использование DRX в протоколе RRC с режимом RRC-Inactive снижает энергозатраты, но увеличивает задержку передачи данных. Константы удельного энергопотребления для состояний ПУ приведены в [87], [126], [128]. и сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 Константы энергопотребления ПУ

Обозначение	Состояние	Удельное энергопотребление
e_{SSB}	Процедура поиска луча (обнаружение SSB)	100 мВт
e_{RACH}	Процедура RACH (установление соединения ПУ с БС)	376,5 мВт
e_{IDLE}	Состояние RRC-Idle	0 мВт
e_i	Состояние RRC- Connected	350 мВт
e_{ON-X}	Процедура «On Duration»	61 мВт
e_{CSS}	Короткий сон C-DRX	45 мВт
e_{CLS}	Длинный сон C-DRX	20 мВт
e_{PC-oc}	Пейджинг «PC Occasion»	1 мВт
e_{PC}	Ожидание пейджинга «PC»	0 мВт

Механизм сигнала пробуждения Wake-Up Signal (WUS)

Недостатком DRX является необходимость ПУ в режиме RRC-Connected регулярно «просыпаться» для «On Duration» даже при отсутствии данных для передачи на БС. Для решения этой проблемы в 3GPP Release 16 представлена технология энергосбережения с помощью «сигнала пробуждения» WUS (рис. 1.5) [48].

WUS представляет собой сигнал с низким энергопотреблением, информирующий ПУ в режиме RRC-Connected о необходимости проверки DCI в PDCCH в интервале «On Duration» после «короткого» или «длинного»

сна DRX. При наличии на БС данных для передачи по нисходящему каналу БС отправляет сигнал WUS на ПУ, после чего ПУ выходит из состояния сна, принимает DCI и переходит к активной передаче данных по каналу PDSCH [88, 90]. Если WUS не отправляется в течение времени PS-offset, ПУ остается в состоянии сна даже в течение интервала «On Duration» следующего цикла DRX.



Рис. 1.5. Схема работы механизма сигнала пробуждения WUS

Механизм релаксации управления радиоресурсами *Radio Resource Management Relaxation (RRM-relaxation)*

В 3GPP Release 15 представлен механизм энергосбережения RRM-relaxation [44]. Протокол RRC, помимо мониторинга PDCCH, предусматривает регулярную оценку RSRP/RSRQ опорного сигнала от БС для текущей и соседних БС с целью оперативного хэндовера. Механизм RRM-релаксации позволяет пропускать измерения при превышении порога RSRP/RSRQ [88]. В

Release 16 условия смягчены: при отсутствии ПУ на границе соты и низкой мобильности пороги могут быть ещё снижены. В Release 17 [52] представлена технология 5G RedCap (Reduced Capability/NR-Light) — стандарт для ПУ среднего уровня с меньшим числом антенн (1–2) и узкой полосой частот. RedCap обеспечивает баланс скорости, задержки и энергоэффективности, снижая стоимость и энергопотребление по сравнению с полноценными 5G-устройствами. Целевые применения: носимые устройства, промышленные датчики, видеонаблюдение, малоподвижные или стационарные ПУ «умных сетей». Согласно Release 17, БС на основе статистики RSRP/RSRQ определяет, удовлетворяет ли ПУ RedCap критерию малоподвижности. Для стационарных ПУ (типично для видеонаблюдения) подключённое ПУ может регулярно пропускать измерения RRM, что снижает энергопотребление.

Функция мультисвязности

Для компенсации негативных эффектов узких лучей в mmWave диапазоне (экстремальные потери распространения, блокировка даже небольшими препятствиями) 3GPP предложил функцию мультисвязности [40]. В рамках RRC-соединения ПУ может поддерживать связь с несколькими доступными БС, выбирая опорную по уровню RSRP/RSRQ. Протокол RRC поддерживает хэндовер intra-RAT и inter-RAT. Передача данных идёт только по одному «активному» каналу от опорной БС. При падении RSRP в активном канале ниже порога (из-за блокировки или микромобильности) ПУ переключается на резервный канал, выбираемый по RSRP/RSRQ. Если ни один канал не обеспечивает требуемый RSRP, происходит разрыв RRC-соединения, ПУ переходит в RRC-Idle и запускает процедуру первичного подключения.

Исследования показали, что мультисвязность значительно улучшает производительность систем mmWave по энергоэффективности и времени отсутствия связи [72], [76], [108], [125], а также параметры QoS: вероятность успешного завершения сессии и использование ресурсов [58], [60]. Энергоэффективность мультисвязности анализируется в [113] на стороне БС,

в [128] — на стороне ПУ, без применения механизмов энергосбережения (режим RRC-Inactive, DRX, WUS, RRM-Relaxation). В [112] с помощью имитационной модели оценены ёмкость соты, надёжность услуги и условия энергоэффективности. В [128] исследован сценарий «двойного подключения» (dual connectivity), повышающий пропускную способность и надёжность при мобильности ПУ. Побочным эффектом мультисвязности стало снижение энергоэффективности ПУ, поскольку энергозатраты могут расти линейно с увеличением числа одновременно поддерживаемых каналов с резервными БС [84], [109].

Показатели энергоэффективности пользовательского устройства

В диссертационной работе для анализа энергоэффективности сетей 5G NR выбраны четыре ключевые метрики: спектральная эффективность, энергопотребление ПУ, энергоэффективность ПУ и время работы батареи ПУ. Выбор обусловлен необходимостью достижения компромисса между производительностью и энергозатратами и ориентирован на пользовательский опыт: энергопотребление и время работы батареи напрямую влияют на продолжительность работы устройства без подзарядки, что является одним из ключевых потребительских свойств товара и учитывается при разработке новых технологий энергосбережения. Для исследования метрик проанализированы международные стандарты, формирующие архитектурные и технические основы современных сетей: рекомендации Международного союза электросвязи (International Telecommunication Union, ITU) [80] с целевыми показателями для IMT-2020, спецификации альянса разработчиков технических и операционных стандартов для ИКТ-отрасли (Alliance for Telecommunications Industry Solutions, ATIS) [46, 49] и Европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) [70], детализирующие архитектурные решения, процедуры управления энергопотреблением и методики тестирования энергоэффективности для RAN и ПУ, а также стандарты представляющей интересы операторов мобильной связи по всему миру торговой «Ассоциации

GSMA» [78] с отраслевыми рекомендациями по критериям экологической маркировки мобильных телефонов с акцентом на энергопотребление и время работы батареи. Рассмотрим метрики исследования подробнее.

- Спектральная эффективность

В концепции ITU-R M.2083–0 [80] спектральная эффективность определяется как средняя пропускная способность канала между приемопередающими устройствами (между ПУ и БС) на единицу спектрального ресурса и на одну соту, измеряется в бит/с/Гц:

$$S_E = \frac{A_T \text{ [бит/с]}}{A_B \text{ [Гц]}}. \quad (1.21)$$

Основным параметром при вычислении средней пропускной способности A_T является SINR, зависящий от мощности передатчика, коэффициентов усиления антенн, потерь при распространении радиосигнала, расстояния между ПУ и БС, уровня шума и интерференции. В главе 1 SINR вычисляется по формуле (1.4) по аналогии с [98]. В главе 2 спектральная эффективность явно определена формулой (2.22), а в главе 3 формула (3.25) уточняет её с учетом динамики усиления антенн и потерь при распространении сигнала.

- Энергопотребление ПУ

Согласно спецификации 3GPP.38. 840.V1600 [46], энергопотребление ПУ — количество энергии, потребляемое устройством (смартфоном, модемом) в сети NR. Оно измеряется за интервал наблюдения и зависит от состояния радиомодуля, модели трафика (активность передачи/приема), конфигурации антенн, режимов энергосбережения и выполняемых задач (мониторинг PDCCH, прием данных по PDSCH, измерения RRM). Энергопотребление вычисляется как средневзвешенное по времени пребывания в состояниях с разным потреблением и измеряется в Вт:

$$P_C = \frac{\sum_i Power (State_i) \text{ [Вт]} \cdot Time (State_i) \text{ [ч]}}{Time_{total} \text{ [ч]}}. \quad (1.22)$$

В главе 1 формула (1.22) определяет энергопотребление ПУ через вектор среднего числа посещений различающихся по энергопотреблению состояний

и вектор энергозатрат. В главе 2 метрика энергопотребления рассчитывается по формуле (2.21), а в главе 3 – по формуле (3.32).

- Энергоэффективность ПУ

Согласно [46] существует два аспекта энергоэффективности:

- с точки зрения сети — количество переданной или полученной информации в битах на единицу энергопотребления в сети радиодоступа (RAN) [бит на джоуль];
- с точки зрения устройства — количество информации в битах на единицу энергопотребления в модуле связи [бит на джоуль].

В ETSI ES 203 228 [70] энергоэффективность определена как отношение объема переданных данных [бит], переданных через сетевой элемент, к потреблению энергии [Дж], измеряется в бит/Дж:

$$P_E = \frac{V \text{ [бит]}}{P_C \text{ [Джоуль]}} \quad (1.23)$$

где V – объем данных, а P_C – энергопотребление. Определение используется во всех технических стандартах (TS) и технических рекомендациях (TR) консорциума 3GPP, начиная с Release 15 (2017).

В главе 1 формула (1.47) рассчитывает энергоэффективность с учетом DRX. В главе 2 формула (2.23) определяет энергоэффективность через спектральную эффективность и энергопотребление для различных приложений и БС. В главе 3 формула (3.37) является наиболее общей и учитывает оба параметра.

- Время работы батареи ПУ

Согласно 3GPP 38.913. V16.0.0 [49] время работы батареи ПУ — максимальная продолжительность работы без подзарядки (не путать со сроком службы батареи — периодом до износа). Для услуг массовой межмашинной связи (Massive Machine-Type Communications, mMTC) время работы батареи при экстремальном покрытии рассчитывается на основе активности обмена данными: 200 байт исходящего трафика (UL) в день, затем 20 байт входящего

(DL), при максимальных потерях (MaxCL) 164 дБ и ёмкости батареи 5 Вт·ч. Через энергопотребление, формула выглядит следующим образом:

$$B_T = \frac{B_C[A \cdot \text{ч}]B_V[B]}{P_C[\text{Вт}]} [\text{ч}], \quad (1.24)$$

где B_C – ёмкость аккумулятора в [А], B_V – напряжение аккумулятора в [В], P_C – энергопотребление в [Вт]. Время работы батареи ПУ в главах 2 и 3 рассчитывается по аналогичным формулам (2.24) и (3.34) соответственно.

Подход к анализу энергоэффективности пользовательского устройства

На рис. 1.6 показан процесс установления, поддержания и разрыва RRC-соединения ПУ для сценария «двойного подключения» (мультисвязность для двух БС), исследуемого в главе 2. Показаны следующие интервалы:

T_O и T_S — активной передачи («on» mode) паузы («standby» mode) в передаче пользовательских данных по каналу PDSCH;

$T_{W,i}^{(l)}$ — простоя канала PDSCH от i -й БС, $i = 1, 2$, во время мониторинга «On Duration», сна, а также выполнения процедур управления радиоканалом и управления лучом, при наличии на БС данных для передачи, $l \geq 1$;

T_B — поиска луча;

T_A — до наступления события микромобильности;

$T_{L,i}$ — до наступления события макромобильности с i -й БС, $i = 1, 2$;

T_L — наличия прямой видимости хотя бы с одной БС;

T_{NL} — блокировки прямой видимости с обеими БС (потеря связи с сетью);

T_C — длительности RRC-соединения.

Заметим, что поиск луча выполняется в рамках процедуры управления лучом при рассогласовании лучей антенн ПУ и БС в случае события микромобильности, а также завершает процедуру управления радиоканалом из-за потери связи с опорной БС в случае события макромобильности, когда выполняется хэндовер — переключение на доступную резервную БС с наилучшим сочетанием параметров RSRP/RSRQ.

При известных энергозатратах (Табл.1.1) схема на рис. 1.6 позволяет оценить энергопотребление и время работы батареи на стороне ПУ

аддитивным подходом. Установление RRC-соединения начинается с управления радиоканалом: синхронизация с энергозатратами e_{SSB} МВт и процедура RACH (random-access channel, канал случайного доступа) для соединения с каждой из N БС, требующая Ne_{RACH} мВт. Затем ПУ устанавливает активный канал с опорной БС и в течение интервала T_O активной передачи данных поддерживает RRC-Connected по активному каналу и RRC-Inactive по резервным каналам с резервными БС. В течение паузы T_S передачи данных (нет передачи данных от БС) ПУ поддерживает соединение в активном и резервных каналах в RRC-Inactive с пониженным потреблением e_{Idle} . В режиме RRC-Connected ПУ расходует энергию на мониторинг PDCCH, а пересечение порога RSRP/RSRQ из-за микро- и макромобильности запускает поиск луча.

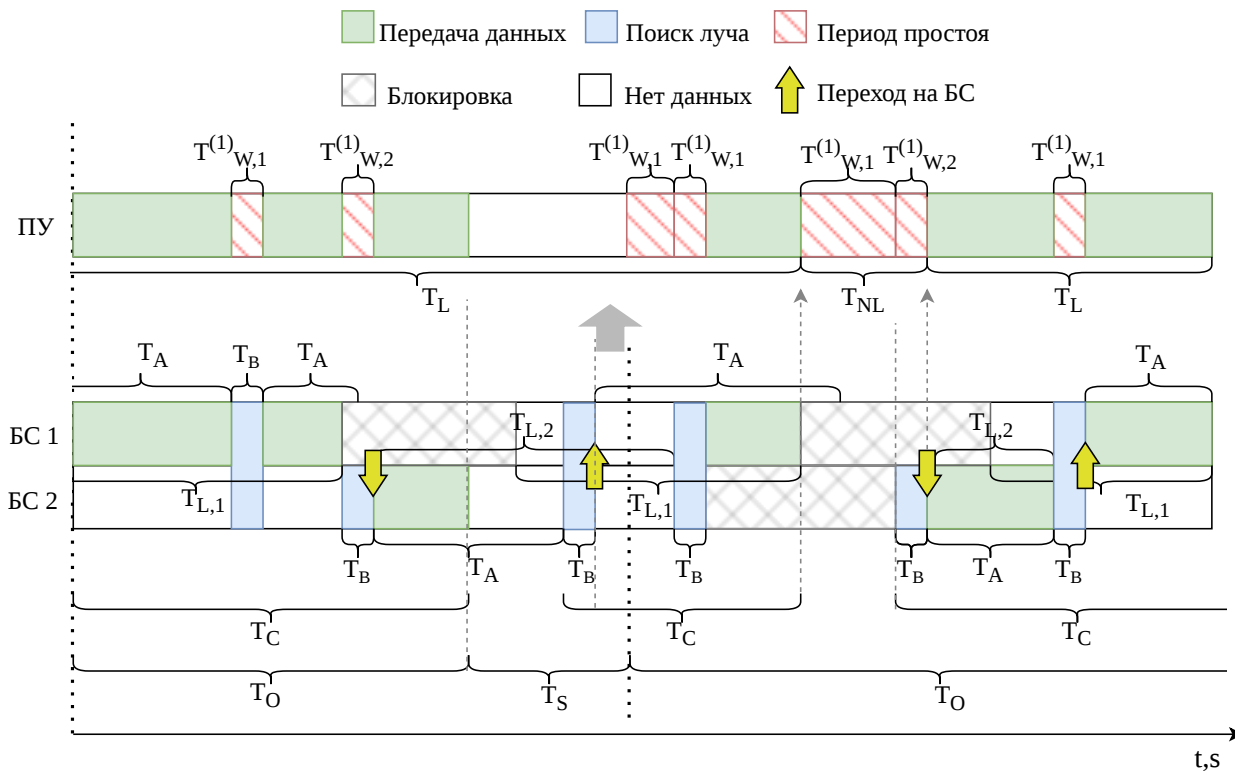


Рис. 1.6. Схема «двойного подключения» ПУ при применении функции мультисвязности

При блокировке прямой видимости с опорной БС без мультисвязности происходит разрыв RRC-соединения, и ПУ переходит в режим RRC-Idle до

подключения к доступной БС. Энергопотребление e_{idle} в этом режиме пренебрежимо мало, однако повторное установление связи требует процедуру RACH и затрат e_{RACH} мВт. При мультисвязности ПУ вместо разрыва RRC-соединения переключается на резервную БС, переводя её из режима RRC-Inactive в RRC-Connected.

При микромобильности для восстановления выравнивания лучей ПУ выполняет поиск SSB в каждом из N частотных диапазонов, полученных от опорной и резервных БС. С точки зрения энергопотребления это требует Ne_{SSB} мВт — столько же, сколько при начальном сканировании частот. Поскольку ПУ выбирает конфигурацию антенны с наилучшим RSRP/RSRQ, сканирование может привести к хэндоверу на другую БС.

Для комплексного анализа энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио» необходимо оценивать длительности состояний ПУ с разным энергопотреблением и объем переданного трафика. В разделе 1.2. на основе модели мультисвязности с произвольным числом БС, учитывающей микромобильность и макромобильность, и модели DRX, построены две базовые модели состояний ПУ в виде цепей Маркова для анализа показателей эффективности ПУ: длительности связи с одной и хотя бы одной БС, числа подключений к каждой БС в течение RRC-соединения, числа событий микро- и макромобильности с каждой БС. В главе 2 построена модель оценки четырёх целевых метрик энергоэффективности ПУ в сети «Новое радио» для мультисвязности с двойным подключением и различных типов приложений, а в главе 3 эта модель расширена учётом дополнительных к DRX механизмов энергосбережения ПУ и их комбинаций.

Построенные во всех трех главах модели на основе подхода к анализу энергоэффективности ПУ позволили достичь цели диссертации— разработать рекомендации по использованию технологий энергосбережения в сетях 5G NR в условиях мультисвязности с учетом микро- и макромобильности.

1.2 Базовые модели состояний пользовательского устройства в виде цепи Маркова

В разделе 1.2. построены базовые модели мультисвязности и модель механизма DRX для RRC-соединения (см. Табл. О.1 в Списке обозначений). С использованием разработанных в разделе 1.1 моделей микро- и макромобильности для оценки длительностей интервалов прямой видимости и блокировки базовые модели раздела 1.2 позволяют оценить длительность RRC-соединения и лежат в основе метода анализа показателей энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио» в главах 2 и 3.

Базовая модель мультисвязности

Сформулируем модель мультисвязности ПУ, исследованную в [8], [99], где учитываются микро- и макромобильность, но не детали DRX и RRC. Модель описывает состояние радиоканала (прямая видимость, блокировка, рассогласование лучей из-за макромобильности) между ПУ и каждой из N доступных БС, перенумерованными по убыванию RSRP. Интервал моделирования: от первичного подключения к сети до потери связи, наступающей при одновременной блокировке прямой видимости со всеми БС. Фактически моделируется состояние ПУ между соседними запусками процедуры первичного подключения. Примем упрощение: RSRP при прямой видимости обратно пропорционален квадрату расстояния между ПУ и БС. По принципам мультисвязности ПУ выбирает опорную БС с наилучшим RSRP. При разрыве соединения с опорной БС из-за блокировки ПУ переключается на следующую БС по уровню RSRP. Переход в состояние блокировки с i -й БС означает, что БС с 1-й по $(i - 1)$ -ю уже заблокированы, поэтому соединение установлено с i -й, на линии видимости которой появился блокатор.

Модель состояний ПУ построена в виде поглощающей цепи Маркова $\{v_n^{multi}, n \geq 0\}$ над пространством состояний $\mathbb{X}^{multi} = \{0, 1, \dots, 3N\}$, как показано на рис. 1.7. Шаги ЦМ связаны с успешным завершением процедуры выравнивания лучей антенн ПУ и БС, а также с событиями макромобильности

и микроподвижности. Пребывание ЦМ в состояниях i , $N + i$, $2N + i$ соответствует нахождению ПУ в условиях прямой видимости, блокировки прямой видимости и микроподвижности ПУ по отношению к i -й БС, $i = 1, \dots, 3N$, а состояние 0 соответствует условиям потери связи ПУ с сетью, в которые ПУ попадает в результате одновременной блокировки прямой видимости со всеми N БС.

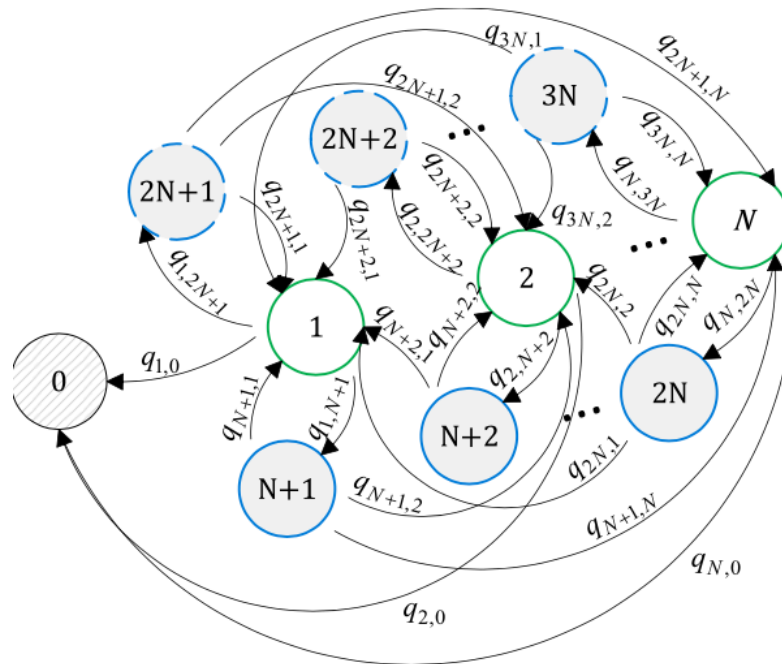


Рис. 1.7. Модель состояния ПУ в RRC-соединении с N БС с функцией мультисвязности без применения механизмов энергосбережения в виде поглощающей ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{multi}$

Случайная длительность RRC-соединения моделируется как интервал наличия связи хотя бы с одной БС, что соответствует времени пребывания ЦМ в подмножестве состояний $\{1, \dots, 3N\}$, до момента разрыва RRC-соединения из-за одновременной блокировки прямой видимости до всех доступных БС, что соответствует попаданию ЦМ в поглощающее состояние 0 [83]. Модель позволяет оценить продолжительность T_L этого периода, среднее число n_i^{multi} подключений ПУ к i -й БС, $i = 1, \dots, N$, среднее число n_i^{multi} событий

блокировки прямой видимости между ПУ и i -й БС, $i = N + 1, \dots, 2N$, и среднее число n_i^{multi} событий микромобильности (рассогласование лучей ПУ и i -й БС, как опорной БС), $i = 2N + 1, \dots, 3N$.

Матрица $\mathbf{Q}^{multi} = [q_{ij}^{multi}]_{i,j \in \mathbb{X}^{multi}}$ переходных вероятностей между состояниями ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\}$ приведена в [99]. Для получения начального распределения ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\}$ сформулируем и докажем следующее утверждение.

Утверждение 1.2. Вероятность p_N потери ПУ связи с сетью (вероятность одновременной блокировки прямой видимости между ПУ и всеми N БС) для случая точечного пуассоновского процесса расположения БС в \mathfrak{R}^2 с параметром λ_A определяется как

$$p_N = \prod_{i=1}^N \left[1 - 2 \int_0^{\infty} \frac{(\pi \lambda_A)^i}{(i-1)!} x^{2i-1} e^{-\pi \lambda_A x^2} \left(1 - e^{-2x r_B \lambda_B \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U}} \right) dx \right]. \quad (1.25)$$

Доказательство. По формуле полной вероятности вероятность блокировки прямой видимости между ПУ и i -й БС имеет вид

$$p_{N,i} = 1 - \int_0^{\infty} f_i(x) p_B(x) dx, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1.26)$$

Согласно [24] для точечного пуассоновского процесса расположения БС в \mathfrak{R}^2 с параметром λ_A функция $f_i(x)$ плотности 2D расстояния до i -й БС имеет вид

$$f_i(x) = \frac{2(\pi \lambda_A)^i}{(i-1)!} x^{2i-1} e^{-\pi \lambda_A x^2}. \quad (1.27)$$

В [73] показано, что вероятность блокировки прямой видимости между БС и ПУ, находящимся от нее на 2D расстоянии x , имеет вид

$$p_B(x) = 1 - e^{-2x r_B \lambda_B \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U}}. \quad (1.28)$$

Из (1.27) и (1.28) получаем (1.26).

В предположении о независимости событий блокировки прямой видимости от ПУ до разных БС вероятность p_{B,i^*} того, что i^* ближайших доступных БС одновременно заблокированы, имеет мультипликативный вид

$$p_{B,i^*} = \prod_{i=1}^{i^*} p_{N,i}, \quad i^* = 1, \dots, N, \quad (1.29)$$

а вероятность выбора i^* -й БС в качестве опорной, определяется формулой

$$P_{L,i^*} = (1 - p_{N,i^*}) \prod_{i=1}^{i^*-1} p_{N,i}, \quad i^* = 1, \dots, N. \quad (1.30)$$

Тогда вероятность p_N того, что все N доступных БС одновременно заблокированы, имеет мультипликативный вид

$$p_N = \prod_{i=1}^N p_{N,i} \quad (1.31)$$

и совпадает с вероятностью потери связи ПУ с сетью.

Утверждение доказано.

Формула (1.25) для вероятности p_N отсутствия связи в Утверждении 1.2 позволяет оценить долю времени, когда все N доступных БС одновременно заблокированы. Для ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{multi}$, моделирующей состояние RRC-соединения, которое всегда начинается с выбора одной из N БС в качестве опорной, компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}^{multi} = (\pi_i^{multi})_{i \in \mathbb{X}^{multi}}$ начального распределения ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\}$ могут быть записаны как

$$\pi_i^{multi} = \begin{cases} P_{L,i}(1 - p_N)^{-1}, & i = 1, \dots, N; \\ 0, & i = 0, N + 1, \dots, 3N, \end{cases} \quad (1.32)$$

где $P_{L,i}$ – вероятность того, что опорной БС для ПУ является i -я БС [99].

Сформулируем результат, который потребуется далее при работе с поглощающими цепями Маркова в этой и следующих главах диссертационной работы. Известно [24], [83], [103], что для поглощающей цепи Маркова над пространством состояний $\mathbb{A} \cup \mathbb{A}_0$, состоящего из подмножества переходных состояний \mathbb{A} и подмножества поглощающих состояний \mathbb{A}_0 , среднее число посещений переходного состояния определяется элементами

фундаментальной матрицы $\mathbf{D} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, где $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{i,j \in \mathbb{A}}$ — подматрица переходных вероятностей поглощающей ЦМ, описывающая процесс до выхода из множества переходных состояний \mathbb{A} , \mathbf{I} — единичная матрица той же размерности. Элемент d_{ij} матрицы $\mathbf{D} = [d_{ij}]_{i,j \in \mathbb{A}}$ — среднее число посещений целью состояния j до поглощения, учитывая, что начальным состоянием ЦМ является состояние i . Фундаментальная матрица позволяет определить среднее число n_j переходов через состояние j до поглощения:

$$n_j = \sum_{i \in \mathbb{A}} \pi_i d_{ij}, j \in \mathbb{A}, \quad (1.33)$$

где $\boldsymbol{\pi} = (\pi_i)_{i \in \mathbb{A} \cup \mathbb{A}_0}$ — вектор начального распределения поглощающей ЦМ.

Согласно (1.33) среднее число n_j^{multi} посещений ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{multi}$ состояния j вычисляется по формуле

$$n_j^{multi} = \sum_{i \in \mathbb{X}^{multi} \setminus \{0\}} \pi_i^{multi} d_{ij}^{multi}, \quad j \in \mathbb{X}^{multi} \setminus \{0\}, \quad (1.34)$$

для начального распределения ЦМ $\boldsymbol{\pi}^{multi} = (\pi_i^{multi})_{i \in \mathbb{X}^{multi}}$ (1.32) и фундаментальной матрицы $\mathbf{D}^{multi} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q}^{multi})^{-1}$, где матрица переходных вероятностей ЦМ \mathbf{Q}^{multi} определена в [99].

Базовая модель механизма DRX для RRC-соединения.

Дополним модель RRC-соединения с мультисвязностью, учитывающую блокировку прямой видимости и микромобильность ПУ, построенную в виде ЦМ $\{v_n^{multi}, n \geq 0\}$, деталями механизма энергосбережения DRX.

Процесс переключения ПУ между тремя режимами RRC при соединении с i -й БС, ($i = 1, \dots, N$), от выравнивания лучей до нарушения связи, моделируется поглощающей цепью Маркова $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$ над пространством состояний $\mathbb{Y}^{DRX} = \{0, 1, \dots, 7\}$, как показано на рис. 1.8. Переходы происходят в моменты срабатывания таймера бездействия, окончания интервалов сна, процедуры «On Duration», цикла пейджинга, а также событий микро- и макромобильности.

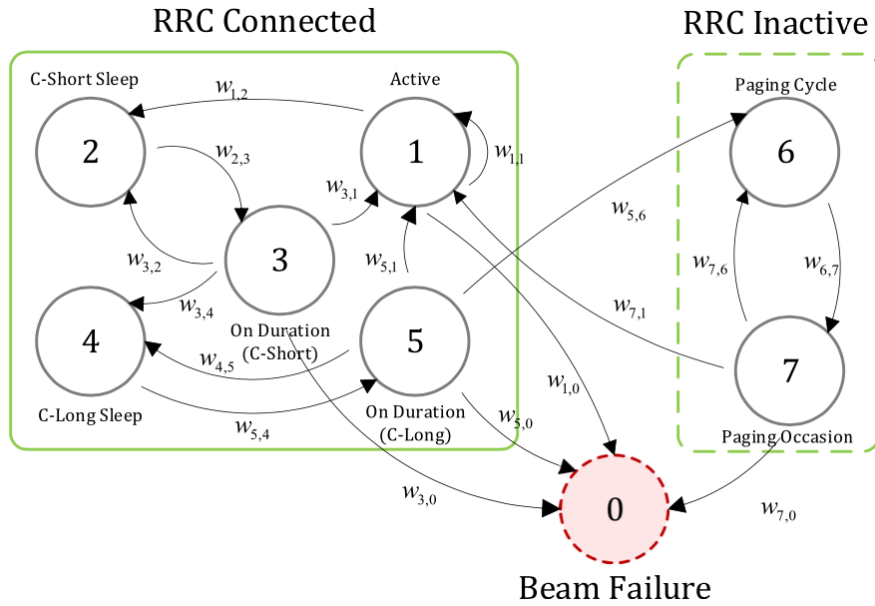


Рис. 1.8. Модель состояния ПУ в RRC-соединении с произвольной БС с учетом механизма прерывистого приема DRX в виде поглощающей ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{DRX}$

Состояния 1–5 соответствуют режиму RRC-Connected. Состояние 1 — передача данных (интервал T_0 в режиме «on»). По окончании этого интервала запускается таймер бездействия: ЦМ $\{\eta_n^{base}, n \geq 0\}$ остается в состоянии 1 (ПУ продолжит прием данных), если по истечении таймера бездействия t_I при выполнении процедуры «On Duration» DCI в PDCCH покажет наличие у БС данные, либо ЦМ перейдет в состояние 2 (короткий сон C-Short Sleep) при отсутствии у БС данных. В состоянии 1 потеря связи из-за блокировки или микроподвижности запускает процедуру управления лучом (Beam Management, BM) для восстановления соединения, представленную поглощающим состоянием 0. Короткий сон (состояние 2) завершается проверкой DCI «C-Short On Duration» (состояние 3): при обнаружении данных ПУ переходит в состояние 1, иначе возвращается в состояние 2. После n_{CSS} подряд циклов C-DRX без данных ПУ переходит в длинный сон (состояние 4) с увеличенными интервалами проверки «C-Long On Duration» (состояние 5).

Аналогично, если данные не обнаружены после n_{CLS} периодов длинного сна, ПУ переходит в режим RRC-Inactive, моделируемый ожиданием пейджинга (состояние 6 ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$) и его выполнением (состояние 7). Цикл пейджинга ограничен таймером T_{DRX} и превышает длительность длинного сна. Число циклов бесконечно, переход ПУ в состояния $\{1, \dots, 5\}$ происходит только через состояние 1 передачи данных.

После окончания активной передачи данных длительностью $T_O \sim \exp(\lambda_O)$ (модель 3GPP FTP Model 3 [36], рис. 1.6) наступает пауза $T_S \sim \exp(\lambda_S)$ в режиме stand-by. ПУ последовательно переходит в состояния короткого сна, длинного сна и цикла пейджинга. Цикл завершается либо потерей связи (отключение питания, авиа-режим или блокировка видимости всех БС) с переходом в RRC-Idle для первичного подключения, либо запуском нового приложения (окончание T_S) и переходом в режим передачи данных RRC-Connected. Параметры экспоненциального распределения длительностей T_O и T_S зависят от приложения, поэтому $\lambda_{T_{O,k}}$ и $\lambda_{T_{S,k}}$ в главах 2 и 3 заданы для каждого k -го приложения, $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$.

В любом из состояний «On Duration» (состояния 3, 5, 7) при проверке DCI ПУ может перейти в состояние передачи данных (состояние 1), либо столкнуться с разрывом RRC-соединения из-за микромобильности или блокировки прямой видимости с опорной БС и переключиться в режим RRC-Idle (поглощающее состояние 0). В нём ПУ остаётся, пока прямая видимость со всеми БС заблокирована. При возможности соединения с доступной БС запускается процедура первичного подключения к сети.

Поскольку ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{DRX}$ построена для анализа состояний ПУ с точки зрения механизма DRX в течение RRC-соединения, т.е. интервала от момента начала процедуры управления радиоканалом при первичном подключении до момента разрыва RRC-соединения, предполагается, что компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}^{DRX} = (\pi_i^{DRX})_{i \in \mathbb{Y}^{DRX}}$ начального распределения ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$ имеют вид

$$\pi_i^{DRX} = \begin{cases} 1, & i = 1; \\ 0, & i \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{1\}. \end{cases} \quad (1.35)$$

Обозначим функцию плотности распределения времени непрерывной связи с i -й БС как $f_{C,i}^{base}(t)$, $i = 1, \dots, N$. Поскольку RRC-соединение прерывается при блокировке прямой видимости или микромобильности, его длительность до рассогласования лучей равна минимуму с.в. $T_{L,i}$ (до блокировки с i -й БС) и с.в. времени T_A (до микромобильности ПУ):

$$f_{C,i}^{base}(t) = f_{T_{L,i}}^{base}(t)[1 - F_{\tilde{T}_A}(t)] + f_{\tilde{T}_A}(t)[1 - f_{T_{L,i}}^{base}(t)], \quad (1.36)$$

где $f_{T_{L,i}}^{base}(t)$ и $F_{T_{L,i}}^{base}(t)$ плотность и функция экспоненциального распределения длительности интервала до блокировки прямой видимости с i -й БС (1.18) с параметром (1.14), $f_{\tilde{T}_A}(t)$ и $F_{\tilde{T}_A}(t)$ — плотность и функция экспоненциального распределения длительности интервала до наступления события микромобильности (1.8) с параметром (1.13). При этом 2D расстояние x между ПУ и БС зависит от номера i БС, перенумерованных по возрастанию расстояния, а плотность $f_i(x)$ 2D расстояния $x(i)$ до i -й БС имеет вид (1.27).

Поскольку обе с.в. $T_{L,i}$ и \tilde{T}_A распределены экспоненциально, их минимум также распределен экспоненциально [103] и обладает свойством отсутствия последействия. Учитывая это, выведем вероятности переходов между состояниями пространства \mathbb{Y}^{DRX} , образующие матрицу $\mathbf{W}^{DRX} = [w_{ij}^{DRX}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}}$ переходных вероятностей для ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$.

Начнем с петли из состояния 1 в состояние 1. Такой переход возможен только, если по истечении таймера бездействия в ходе процедуры «On Duration» обнаружены данные для передачи, т.е. после нее начнется интервал $T_{O,k}$ активной передачи пользовательских данных приложения k , и при этом не произойдет потеря связи с i -й БС из-за макро- или микромобильности, что приводит к следующим результатам:

$$w_{11}^{DRX} = \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{O,k}(x) dx \cdot \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy, \quad (1.37)$$

$$i \in \{1, \dots, N\}, k \in \{1, \dots, N_{App}\},$$

где $f_{0,k}(x) = \lambda_{0,k} e^{-\lambda_{0,k}x}$ плотность экспоненциального с параметром $\lambda_{0,k}$ распределения длительности интервала активной передачи пользовательских данных приложения $k, k \in \{1, \dots, N_{App}\}$. В (1.37) кроме значения таймера бездействия t_I учтено также время t_{on} выполнения процедуры «On Duration».

Переход в состояние 2, соответствующее короткому сну в подключенном режиме RRC-Connected, происходит в случае, когда до срабатывания таймера бездействия начался интервал паузы в передаче данных T_S при отсутствии потери связи с i -й БС, т. е.

$$w_{12}^{DRX} = \int_0^{t_I+t_{on}} f_{S,k}(x) dx \cdot \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{C,i}(y) dy, \quad (1.38)$$

$$i \in \{1, \dots, N\}, k \in \{1, \dots, N_{App}\},$$

где $f_{S,k}(x) = \lambda_{S,k} e^{-\lambda_{S,k}x}$ плотность экспоненциального с параметром $\lambda_{S,k}$ распределения длительности паузы в передаче данных приложения $k, k \in \{1, \dots, N_{App}\}$.

Переход из состояния 1 в поглощающее состояние 0 связан с разрывом RRC-соединения с i -й БС до срабатывания таймера бездействия. Вероятность этого события имеет вид

$$w_{10}^{DRX} = \int_0^{t_I+t_{on}} f_{C,i}^{base}(x) dx, \quad i \in \{1, \dots, N\}. \quad (1.39)$$

Единственный возможный переход из состояния короткого сна в подключенном режиме RRC-Connected в любое другое состояние ПУ происходит через процедуру C-Short «On Duration», соответствующую состоянию 3. Таким образом,

$$w_{23}^{DRX} = 1. \quad (1.40)$$

Формулы (1.37) – (1.40) доказываются аналогично утверждению 1.2. Остальные переходные вероятности ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{DRX}$ получены аналогично и приведены в Приложении 1.

Согласно (1.33) среднее число n_j^{DRX} посещений ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{DRX}$ состояния j вычисляется по формуле

$$n_j^{DRX} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}} \pi_j^{DRX} d_{ij}^{DRX}, \quad j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}, \quad (1.41)$$

для начального распределения ЦМ $\boldsymbol{\pi}^{DRX} = (\pi_i^{DRX})_{i \in \mathbb{X}^{multi}}$ (1.35) и фундаментальной матрицы $\mathbf{D}^{DRX} = (\mathbf{I} - \mathbf{W}^{DRX})^{-1}$.

Таблица 1.2. Параметры механизма DRX

Обозначение	Описание	Значение
t_I	Таймер бездействия	2 мс
t_{on}	Длительность процедуры «On Duration»	2 мс
t_{CSS}	Таймер короткого сна C-DRX	5 мс
t_{CLS}	Таймер длинного сна C-DRX	32 мс
n_{CSS}	Число циклов короткого сна в C-DRX	2
n_{CLS}	Число циклов длинного сна в C-DRX	3
T_{DRX}	Длительность цикла пейджинга механизма DRX	320 мс
T_{BFI}	Пороговое значение числа индикаций неисправности луча	2

1.3 Применение базовых моделей к решению задачи мультисвязности и численный анализ

Определив параметры поглощающей ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$, оценим энергопотребление для RRC-соединения между ПУ и произвольной i -й БС по формуле (1.22):

$$P_{C,i}^{DRX} = \sum_{j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}} n_j^{DRX} e_j t_j, \quad (1.42)$$

где e_j и t_j представляют собой константу энергопотребления (Табл. 1.1) и длительность однократного пребывания ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$ в состоянии $j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}$ (Табл. 1.2), а среднее число n_j^{DRX} посещений ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$ состояния $j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}$ вычисляется по формуле (1.41). В правой части (1.42) номер i опорной БС влияет на значение n_j^{DRX} , через элементы матрицы

переходных вероятностей \mathbf{W}^{DRX} зависящее от плотности $f_{C,i}^{base}(t)$ случайной длительности RRC-соединения с i -й БС до момента рассогласования лучей антенн ПУ и БС из-за макро- или микромобильности ПУ, $i = 1, \dots, N$, имеющей вид (1.36).

Для определения спектральной эффективности, энергопотребления и энергоэффективности по формулам (1.21) -(1.23) следует учитывать перерывы в передаче пользовательских данных по PDSCH во время мониторинга «On Duration», сна, а также выполнения процедур управления радиоканалом и лучом (рис. 1.6). Таким образом, при оценке времени фактической передачи данных по PDSCH в течение RRC-соединения с БС необходимо оценить простой канала PDSCH во время указанных перерывов.

Утверждение 1.3. Для оценки суммарной длительности интервалов $T_{W,i}$ простоя канала PDSCH передачи пользовательских данных от произвольной i -й БС, $i \in \{1, \dots, N\}$, в течение RRC-соединения с i -й БС может быть использовано следующее выражение:

$$T_{W,i} = \frac{1}{2} \sum_{i^*=1}^N P_{i^*} \left(P_{S,i^*} \sum_{l \in \{on, Son, Lon, SSleep, LSleep\}} n_l^{DRX} t_l + \sum_{j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}} n_0^{DRX} t_{BFM} \right) + \frac{1}{2} P_{B,i} t_{RLF}, \quad (1.43)$$

где P_{i^*} – вероятность того, что опорной является i^* -я БС по (1.30); $P_{B,i}$ – вероятность нарушения выравнивания лучей ПУ и опорной i -й БС в результате микромобильности ПУ по (1.28); t_l – длительности таймеров DRX из Табл. 1.2, $l \in \{on, Son, Lon, SSleep, LSleep\}$; t_{BFM} и t_{RLF} – длительности процедур управления лучом после события микромобильности и управления радиоканалом после события макро-мобильности, а вероятность нахождения ПУ в спящем режиме при попытке опорной i^* -й БС начать передачу пользовательских данных определяется формулой

$$P_{S,i^*} = 1 - \frac{n_1^{DRX}}{\lambda_0 \int_0^\infty t \cdot f_{C,i}^{base}(t) dt}, \quad i^* = 1, \dots, N. \quad (1.44)$$

Доказательство. Простой возникает по трем причинам: при появлении данных на БС ПУ находится либо в состоянии сна, в процедуре управления лучом после микромобильности (рассогласование лучей ПУ и БС) или в процедуре управления радиоканалом после макромобильности (блокировка прямой видимости). При равномерном распределении длительности простоя средняя длительность по каждой из трех причин равна половине максимальной длительности интервала простоя по соответствующей причине.

Для оценки средней длительности пребывания ПУ в состоянии сна необходимы следующие промежуточные параметры:

$n_1^{DRX} = \sum_{j \in \mathbb{Y}^{DRX}} \pi_j^{DRX} w_{j1}^{DRX}$ – среднее число посещений ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$ состояния 1 (передачи данных от БС к ПУ) по формуле (1.41);

$\int_0^\infty t \cdot f_{C,i}^{base}(t) dt$ – средняя длительность интервала до разрыва RRC-соединения с опорной i^* -й БС из-за микро- или макромобильности, где $f_{C,i^*}(t)$ определена по формуле (1.36);

$\lambda_0 \int_0^\infty t \cdot f_{C,i}^{base}(t) dt$ – среднее число попыток начать передачу данных от опорной i^* -й БС к ПУ;

$\frac{n_1^{DRX}}{\lambda_0 \int_0^\infty t \cdot f_{C,i}^{base}(t) dt}$ – вероятность мгновенного перехода в состояние 1 при появлении на опорной i^* -й БС данных для передачи (доля успешных попыток начать передачу к общему числу попыток начать передачу данных при их появлении на БС).

Отсюда по формуле полной вероятности вероятность P_{S,i^*} нахождения ПУ в спящем режиме в момент появления на опорной i^* -й БС данных для передачи, $i^* = 1, \dots, N$, определяется выражением (1.44) как дополнительная вероятность, т.е. доля неуспешных (вследствие сна ПУ в момент появления данных для передачи на БС) попыток начать передачу к общему числу попыток начать передачу данных при их появлении на БС.

Зная среднюю суммарную длительность $\sum_{l=1}^5 n_l^{DRX} t_l$ работы ПУ в режиме RRC-Connected до разрыва RRC-соединения, долю P_{S,i^*} от нее, которую ПУ проводит в состоянии сна, и вероятность P_{i^*} того, что опорной является i^* -я БС, по формуле (1.30), получили оценку в виде первого слагаемого (1.43).

Вклад в виде второго слагаемого (1.43) получен с учетом среднего числа $\sum_{j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}} \pi_j^{DRX} w_{j0}^{DRX}$ событий микро- или макромобильности, после которых в ходе выполнения процедур управления лучом или управления радиоканалом выравнивание лучей ПУ и БС было восстановлено, и длительности t_{BFM} выполнения процедуры управления лучом.

И, наконец, последнее слагаемое (1.43) определяется вероятностью $P_{B,i}$ разрыва RRC-соединения в результате события микро- или макромобильности, после которого выравнивание лучей ПУ и БС не было восстановлено, а также длительностью t_{RLF} выполнения процедуры управления радиоканалом. Здесь $P_{B,i}$ определяется по формуле (1.28) для 2D расстояния x с плотностью распределения $f_i(x)$ по формуле (1.27), $i = 1, \dots, N$. *Утверждение доказано.*

Поскольку во время простоя, как и во время блокировки прямой видимости, передачи пользовательских данных по каналу PDSCN не происходит, для расчета спектральной эффективности $S_{E,i}^{DRX}$ с учетом времени простоя $T_{W,i}$ формула (1.21) для S_E должна быть уточнена следующим образом:

$$S_{E,i}^{DRX} = \frac{E[T_{L,i}] - T_{W,i}}{E[T_{NL,i}] + E[T_{L,i}]} E[S_{E,i}], \quad (1.45)$$

где $E[T_{L,i}]$ и $E[T_{NL,i}]$ – средние длительности случайного интервала прямой видимости и случайного интервала блокировки прямой видимости с опорной i -й БС, при этом плотности распределения с.в. $T_{L,i}$ и $T_{NL,i}$ определяются формулой (1.18) с параметром (1.14) и формулой (1.20) с параметром (1.19) соответственно, $E[S_{E,i}]$ – средняя спектральная эффективность при базовой скорости передачи пользовательских данных в радиоканале между ПУ и опорной i -й БС с использованием теоремы Шеннона-Хартли [127]:

$$E[S_{E,i}] = \int_0^{\infty} \log_2(1 + S(f_i(x))) f_i(x) dx, \quad (1.46)$$

где $S(\cdot)$ — отношение сигнал-шум, определенное формулой (1.4), $f_i(x)$ — функция плотности 2D расстояния $x(i)$ до i -й БС, определенная формулой (1.27).

При этом простой занимает долю $T_{W,i}/(E[T_{NL,i}] + E[T_{L,i}])$, а блокировка прямой видимости - долю $E[T_{NL,i}]/(E[T_{NL,i}] + E[T_{L,i}])$ от длительности RRC-соединения с i -й БС, как с опорной БС.

Наконец, энергоэффективность может быть получена по формуле (1.23):

$$P_{E,i}^{DRX} = \frac{S_{E,i}^{DRX}(T_{W,i})}{P_{C,i}^{DRX}}. \quad (1.47)$$

Для проведения численного анализа был разработан скрипт в среде Wolfram Mathematica, позволяющий выполнять вычисления по аналитическим формулам. Входные параметры приведены в таблице в соответствии с [129], [130].

Таблица 1.3. Данные для численного эксперимента

Обозначение	Описание	Значение
λ_A, λ_B	Плотность БС / блокаторов	0,001 ед./м ² , 0,3 ед./м ²
r_B	Радиус блокатора	0,4 м
h_B, h_U	Высота блокатора / ПУ	1,7 м, 1,5 м
h_A	Высота БС	4 м
v_B	Скорость блокатора	1 м/с
P_A	Излучаемая мощность передающей антенны	2 Вт
ζ	Коэффициент затухания сигнала в незаблокированном состоянии	2,1
I_M	Граница затухания сигнала	3 дБ
T_P	Время обновления поиска луча	10 мс
N_A, N_U	Число антенных элементов на БС / ПУ	16x4, 4x4
N	Число БС	3
N_0	Шум	-84дБ
$\Delta x = \Delta y$	Скорости смещения ПУ по осям 0x и 0y	3 см/с

$\Delta\theta = \Delta\phi$	Угловые скорости смещения осей ПУ при рысканье (угол азимута) и тангаже (угол места)	0,1 °/с
λ_0, λ_S	Интенсивность переключения в режим активной/ паузы передачи пользовательских данных	2 с ⁻¹ , 0,5 с ⁻¹

Сосредоточимся на энергопотреблении и энергоэффективности. Согласно [111], [112] основным параметром микромобильности, влияющим на производительность системы, является угловое смещение, поэтому исследована энергоэффективности от скоростей рыскания (yaw) и тангажа (pitch) при постоянных линейных перемещениях ПУ $\Delta x = \Delta y = 3 \frac{\text{см}}{\text{с}}$.

Рассмотрим влияние микромобильности, блокаторов и степени мультисвязности на энергопотребление. Помимо общего энергопотребления, проанализируем объем энергии, потребляемую соединениями с опорной и резервными БС, а также затрачиваемую на процедуры управления радиоканалом и лучом. Управление радиоканалом подразумевает изменение точки подключения (выбор и переключение на резервную БС), управление лучом – поиск луча, т. е. взаимное выравнивание лучей антенн ПУ и опорной БС в случае их рассогласования, вызванного микромобильностью.

На рис. 1.9 видно, что с ростом угловой скорости микромобильности, вызывающей перебои связи, энергопотребление резко возрастает. Это объясняется частой сменой БС при каждом выходе ПУ из сна. Влияние микромобильности на остальные компоненты энергопотребления пренебрежимо мало: лишь незначительно растёт расход энергии активного канала, так как при большей скорости микромобильности ПУ тратит больше времени на восстановление связи с ближайшей БС.

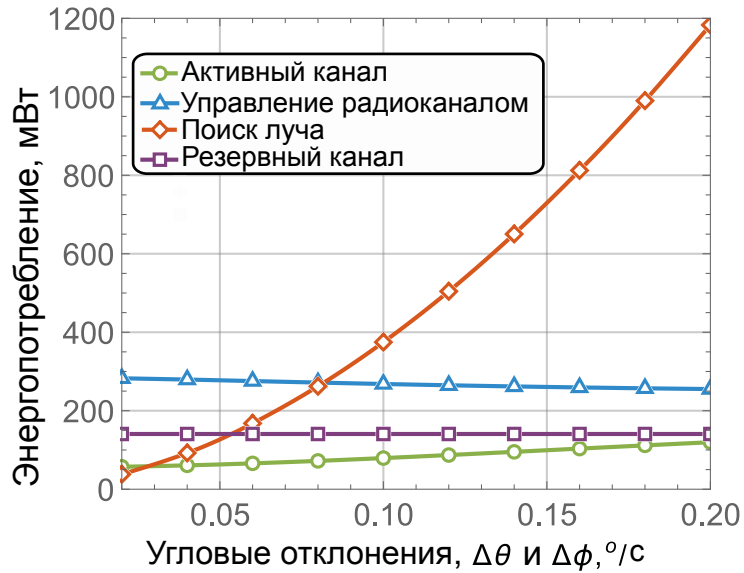


Рис. 1.9. Энергопотребление в зависимости от микромобильности

Влияние плотности блокаторов (рис. 1.10) имеет иной характер: с её ростом энергозатраты на управление радиоканалом увеличиваются линейно. Это объясняется тем, что с ростом вероятности блокировки увеличивается доля времени потери связи ПУ, и процедура поиска луча выполняется чаще. Однако это почти полностью компенсируется снижением энергозатрат на резервные соединения из-за блокировки прямой видимости до резервных БС. Два других компонента остаются постоянными и не зависят от плотности блокаторов.

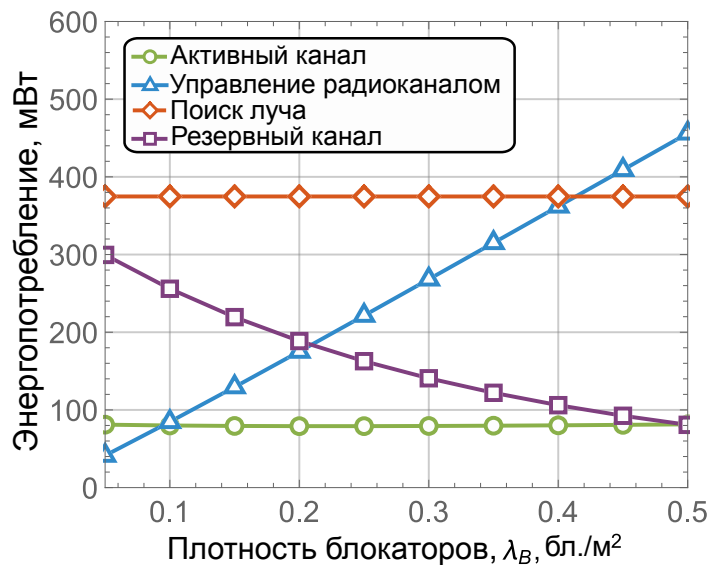


Рис. 1.10. Энергопотребление в зависимости от плотности блокаторов

Далее исследуем энергоэффективность — число переданных бит на джоуль энергии на кГц полосы (бит/Дж/кГц). Как показано на рис. 1.11 с ростом скорости микромобильности энергоэффективность ПУ снижается, так как увеличиваются как энергопотребление, так и доля времени простоя.

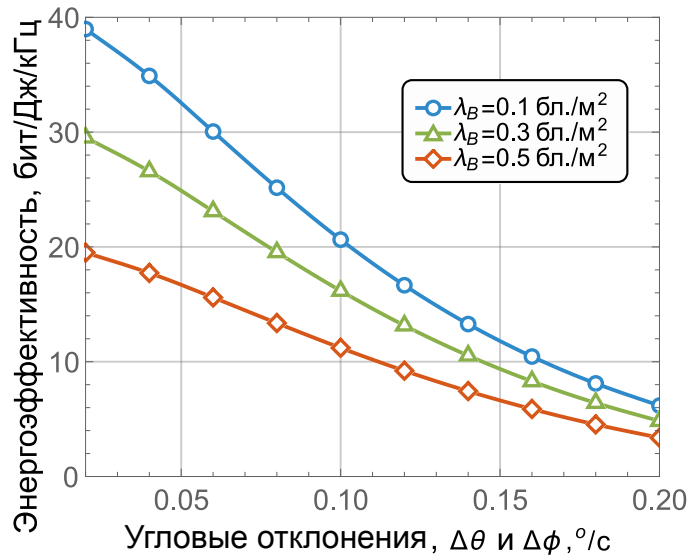


Рис 1.11 Энергоэффективность в зависимости от микромобильности

Аналогичный эффект наблюдается на рис. 1.12, где показана энергоэффективность в зависимости от плотности блокаторов. Однако, как можно заметить, при высокой скорости микромобильности влияние увеличения плотности блокаторов становится незначительным.

Заметим, что увеличение скорости микромобильности с 0.1°/с до 0.3°/с приводит к падению энергоэффективности примерно на 90% — с 18 бит/Дж/кГц до всего лишь 2 бит/Дж/кГц при плотности блокаторов 0.1 бл./м²). В то же время, если скорость микромобильности сохранить постоянной на уровне 0.1°/с, а плотность блокаторов увеличить с 0.1 бл./м² до 0.3 бл./м², то энергоэффективность снизится лишь примерно на 12% — с 18 бит/Дж/кГц до 16 бит/Дж/кГц. Подчеркнем, что это наблюдение справедливо даже для достаточно высокой степени мультисвязности $N = 3$.

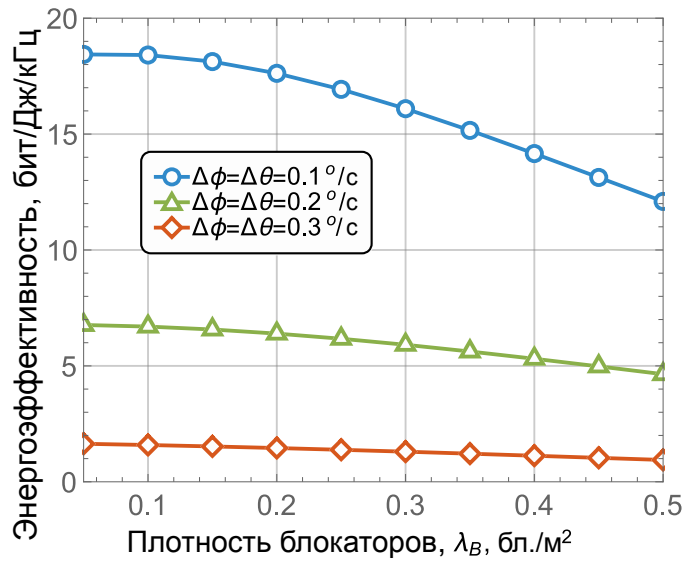


Рис. 1.12. Энергоэффективность в зависимости от плотности блокаторов

Далее рассмотрим влияние мультисвязности на энергопотребление ПУ. График показывает энергозатраты на активные и резервные соединения, а также на процедуры управления радиоканалом и лучом. На рис. 1.13 видно, что энергозатраты на резервные соединения растут с увеличением степени мультисвязности N . Уже при $N = 2$ они сопоставимы с затратами на активное соединение, делая $N \geq 3$ малопривлекательными для большинства приложений. Энергия на управление радиоканалом и лучом доминирует в общем потреблении, превышая затраты на активное соединение в 2–3 раза, и практически не зависит от N .

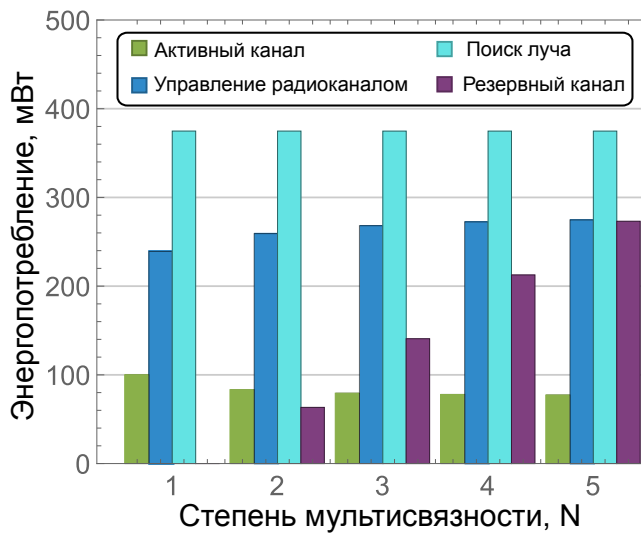


Рис. 1.13. Энергопотребление в зависимости от степени мультисвязности

Аналогично проверим влияние степени мультисвязности на энергоэффективность.

На рис. 1.14 видно, что при заданной скорости микромобильности и малой плотности блокаторов, энергоэффективность существенно зависит от степени мультисвязности. При $\lambda_B = 0.1$ бл./м² наблюдается значительное ухудшение производительности по мере роста значения параметра N . Однако при высокой плотности блокаторов мультисвязность позволяет поддерживать практически одинаковый уровень энергоэффективности для всех рассматриваемых значений степени мультисвязности.

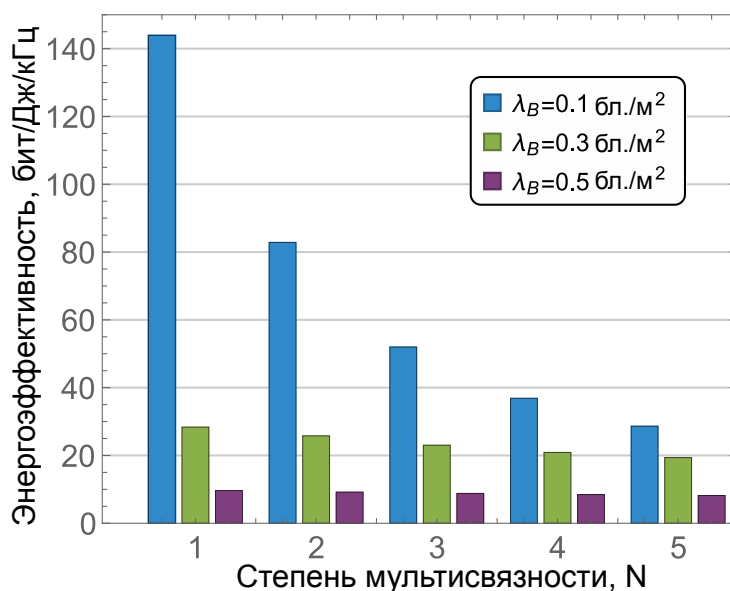


Рис 1.14 Энергоэффективность в зависимости от степени мультисвязности

При высокой плотности блокаторов рекомендуется использовать мультисвязность. Мультисвязность не улучшает энергоэффективность приложений с высокой скоростью микромобильности, делая степени $N \geq 3$ малопривлекательными для большинства приложений. При умеренной и низкой скорости микромобильности энергоэффективность зависит от плотности блокаторов. Эффективная степень мультисвязности определяется скоростью микромобильности и плотностью блокаторов и должна динамически обновляться в процессе работы ПУ.

Анализ подтверждает востребованность мультисвязности для обеспечения непрерывности соединения в сетях 5G NR. Спецификация 3GPP [35] рекомендует реализацию в виде «двойного подключения» (dual connectivity) — поддержание связи ПУ не более чем с двумя БС. Анализ энергоэффективности 5G NR при двойном подключении проведён в главе 2 диссертации.

ГЛАВА 2.

Модель двойного подключения как реализации мультисвязности

Несмотря на стандартизацию 5G NR консорциумом 3GPP, современные развертывания ограничены микроволновым диапазоном (μ Wave) — волны от 1 м до 1 мм (частоты 300 МГц – 300 ГГц). Микроволны распространяются в пределах прямой видимости: в отличие от низкочастотных волн, они не огибают препятствия, не следуют рельефу и не отражаются от ионосферы, поэтому наземные каналы ограничены визуальным горизонтом 40–50 км в зависимости от высоты антенн и рельефа. Границы между дальним ИК-диапазоном, терагерцевым излучением, микроволнами и дециметровыми волнами условны и различаются в зависимости от области применения.

В технических отчетах 3GPP причинами названы ограниченный радиус покрытия 5G NR и ненадежность передачи из-за микромобильности ПУ [112], [134] и блокировки прямой видимости ПУ–БС [91], [125], приводящие к временной потере соединения.

Для повышения надежности обслуживания в 5G mmWave стандарт 3GPP TS 37.340 предлагает функцию мультисвязности [40] с использованием БС одной RAT (intra-RAT) или нескольких (inter-RAT). Эти методы значительно улучшают спектральную эффективность и производительность при потере соединения ПУ с опорной БС [1], [60], [72], [135].

Мультисвязность существенно повышает энергозатраты ПУ из-за поддержания, помимо активного канала с опорной БС, нескольких резервных каналов. Компромиссное решение, стандартизированное 3GPP [35] — 5G dual connectivity: подключение ПУ одновременно не более чем к двум БС, обслуживающим ПУ и подключённым к одной сети в режиме inter-RAT (NR-LTE) или intra-RAT (NR-NR). Для дополнительной экономии энергии стандарты 5G NR значительно расширяют функциональность механизма прерывистого приёма DRX систем 4G LTE.

Ранее в главе 1 показано, что мультисвязность улучшает производительность ПУ при блокировке прямой видимости с опорной БС. В

[100] получена верхняя граница пропускной способности канала при блокировке. Имитационное моделирование [114] продемонстрировало рост пропускной способности при двух одновременных соединениях, а в [111] для микромобильности показано, что поиск луча по запросу максимизирует ёмкость канала.

Исследования работ [59], [101], [131] показали, что временная выгрузка трафика с NR на LTE может снизить производительность однополосных ПУ. Тем не менее, межсетевая мультисвязность остаётся целесообразным вариантом повышения производительности ПУ в будущих системах 5G/6G, поскольку даже совместные развёртывания mmWave и sub-ТГц не гарантируют полностью надёжного обслуживания.

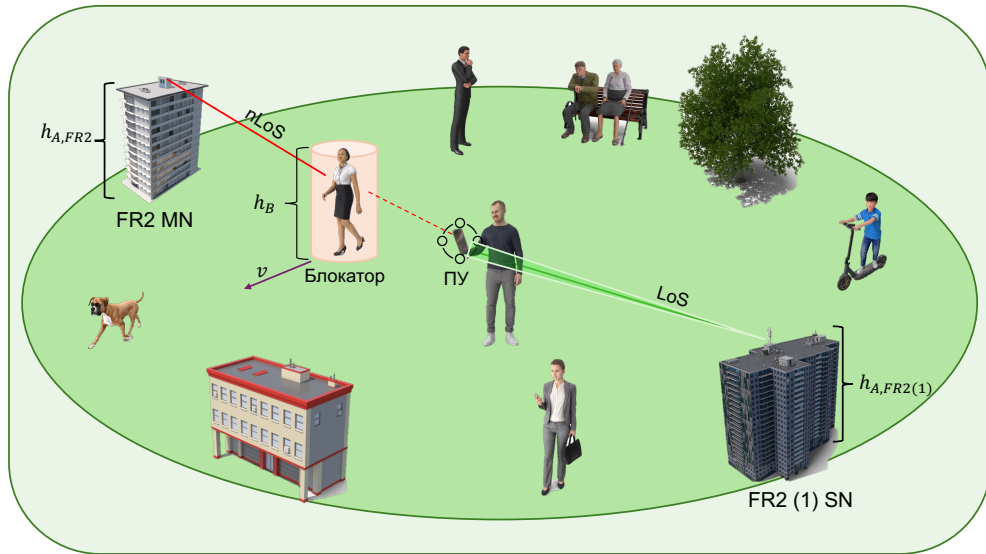
Несмотря на исследования энергоэффективности, мало работ посвящено энергопотреблению и времени работы батареи ПУ. Такие исследования должны учитывать мультисвязность в 5G NR с расширенным механизмом DRX, а также сценарии использования и трафик приложений. В отличие от перечисленных работ, цель главы 2 — сравнение энергопотребления, энергоэффективности и времени работы батареи ПУ с двойным подключением при реалистичных сценариях использования.

2.1 Системная модель двойного подключения

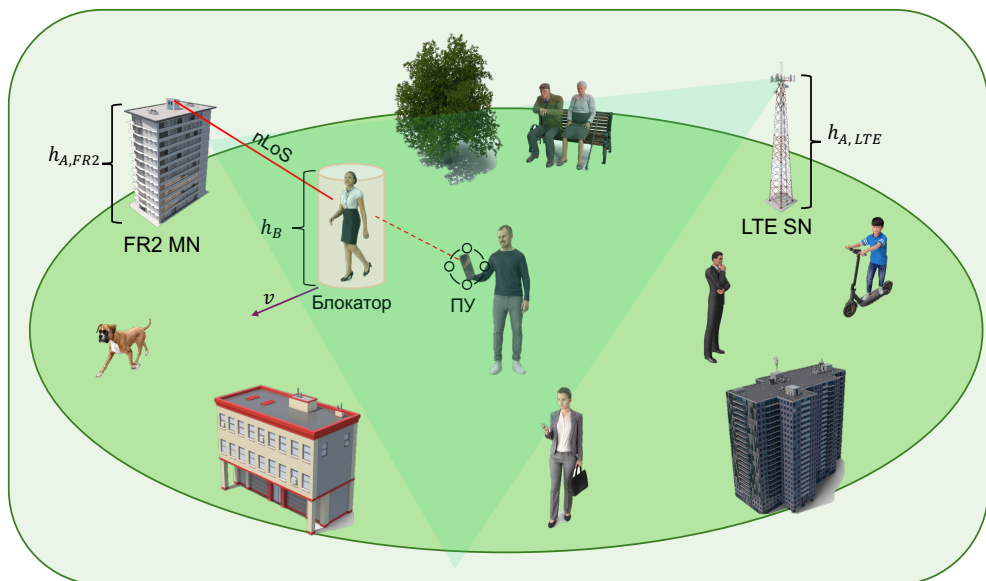
Рассмотрим развёртывание БС NR и LTE с перекрывающимися зонами покрытия, где приоритетной опорной БС (основной узел, Main node, MN) для ПУ является mmWave БС NR FR2. Согласно [35], оценены три сценария двойного подключения: внутрисетевое intra-RAT (рис. 2.1(а)), где резервной БС (вторичный узел, Secondary node, SN) выступает БС той же технологии mmWave NR FR2 (сценарий 1, C1) или NR FR1 (сценарий 2, C2), и межсетевое inter-RAT (рис. 2.1(б)), где резервной БС является БС LTE (сценарий 3, C3).

Дополнительно рассмотрены два сценария одиночного подключения: только FR1 и только LTE. Для внутрисетевого двойного подключения intra-

RAT FR2/FR2 предполагается, что основной выбирается БС с максимальным значением RSRP на стороне ПУ [105].



(а) сценарий C1 FR2/FR2 и сценарий C2 FR2/FR1



(б) сценарий C3 FR2/LTE

Рис. 2.1. Системная модель двойного подключения:
(а) C1 и C2 - внутрисетевое, (б) C3 – межсетевое

Модель развертывания построена в главе 1. Высоты ПУ, БС, модели блокатора, антенной решетки, микро- и макромобильности, поиска луча и

модель трафика описаны в главе 1. Механизм прерывистого приема DRX для внутрисетевого двойного подключения intra-RAT подробно описан в [62] с акцентом на особенности технологии 5G NR. Ниже используется аналогичный подход, адаптированный для решаемой задачи.

Уточнение структуры трафика

В таблице 2.1 [123] представлена структура трафика при использовании устройства по категориям с указанием доли времени в процентах, проводимого пользователем в пяти наиболее популярных приложениях, $N_{App} = 5$.

Таблица 2.1. Структура трафика приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$

Приложение \ Категория трафика	Веб-серфинг, %	Мобильные игры, %	Просмотр видео, %	Голосовые вызовы, %	VR, %
Потребление контента	50	10	10	20	10
Игры	10	50	20	10	10
Соц. сети	20	20	10	10	40

Три категории трафика — потребление контента, игры и социальные сети — характеризуются преобладающими действиями пользователя: поворот устройства на 90° для потребления контента, высокая микромобильность для игр, низкая микромобильность для общения в соцсетях. Характеристики трафика для пяти приложений, включая скорости передачи данных, параметры микромобильности ПУ и длительности интервалов активной передачи/пауз, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Характеристики приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$

Приложение	Передача данных, Мбит/с	Микро-мобильность, градус/с	Активная передача пользовательских данных $T_{O,k}$, с	Пауза в передаче данных $T_{S,k}$, с
Веб-серфинг	3	0.1	1	60

Мобильные игры	12	0.3	180	5
Просмотр видео	5	0.1	180	5
Голосовые вызовы	0.064	0.1	180	5
VR	50	0.2	180	5

Для анализа показателей энергоэффективности сетей 5G NR в сценариях двойного подключения, в том числе сравнения с одиночным подключением, необходимо оценивать длительности подключения к каждой БС при предоставлении услуг с разным энергопотреблением ПУ. В разделе 2.2 на основе моделей главы 1 построена модель состояний ПУ для двойного подключения в виде трёхуровневой поглощающей ЦМ и получен метод анализа целевых метрик: спектральной эффективности, энергоэффективности, энергопотребления и времени работы батареи ПУ.

2.2 Модель состояний пользовательского устройства для анализа сценариев двойного подключения

Предлагаемая ниже модель состояний ПУ имеет трехуровневую структуру, где каждый уровень описывается собственной поглощающей цепью Маркова (ЦМ), как показано на рис. 2.2 (см. Табл. О.2 в Списке обозначений). При построении используется принцип декомпозиции: состояние верхнего уровня представляет собой самостоятельную ЦМ нижнего уровня. Уровни II и III основаны на базовых моделях мультисвязности и DRX из главы 1, а на уровне I они дополнены возможностью переключения пользователя между приложениями. Как и в главе 1, поглощающие ЦМ уровней II и III моделируют состояние ПУ в течение RRC-соединения — от первичного подключения до потери связи из-за одновременной блокировки прямой видимости со всеми БС. ЦМ уровня I переходит в поглощающее состояние по завершении интервала наблюдения.

На *первом* уровне моделируется последовательный запуск приложений на ПУ для оценки времени в каждом из них, поэтому пространство состояний ЦМ включает приложения из Табл. 2.1, состояние «Idle» (интервалы переключения между приложениями), и поглощающее состояние «End» (разрыв RRC-соединения). Длительности пребывания в переходных состояниях распределены экспоненциально со средними, соответствующими характеристиками приложений (Табл. 2.2). Вероятности переходов ЦМ настроены так, чтобы доля суммарного времени в каждом приложении соответствовала структуре трафика (Табл. 2.1).

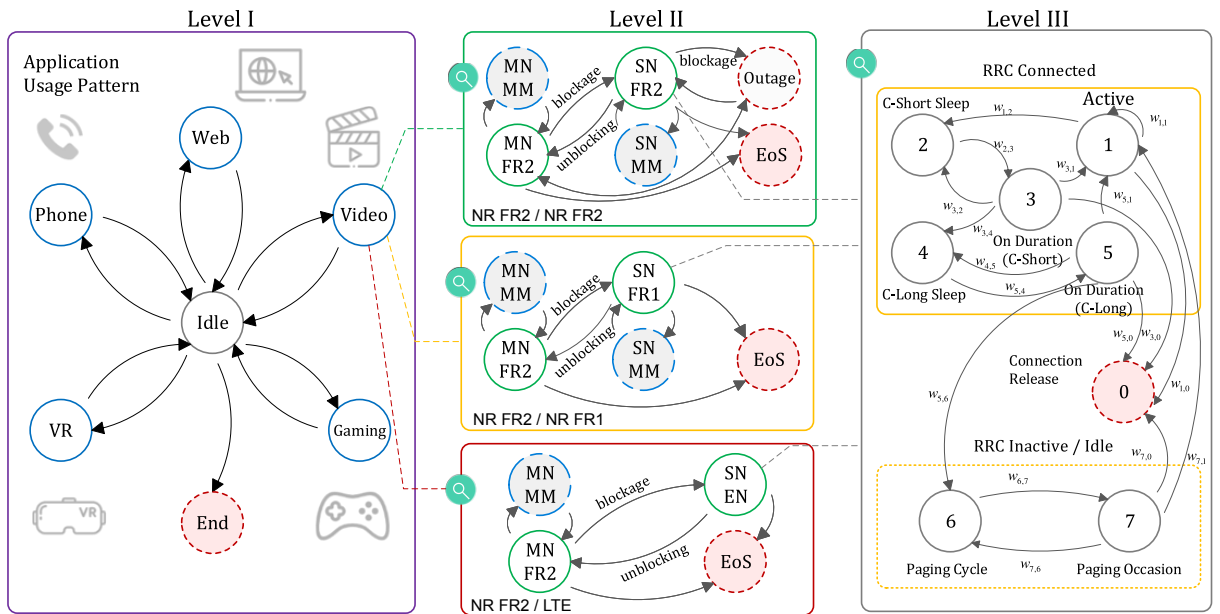


Рис. 2.2. Модель состояния ПУ в сценариях двойного подключения с учетом типов приложений в виде трех уровней цепей Маркова:

уровень I – $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{dual}$ (приложения),

уровень II – $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}, m=1,2,3$ (сценарии),

уровень III – $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$ (DRX)

На *втором* уровне модели для оценки времени подключения к основной (MN) и к резервной (SN) БС в сценариях двойного подключения каждое из состояний первого уровня представлено в виде поглощающей ЦМ, построенной на основе базовой модели мультисвязности главы 1. Построены

три поглощающие ЦМ для трех возможных сценариев двойного подключения C1, C2 и C3, в каждом из которых в качестве основной (MN) БС используется БС NR FR2. В зависимости от типа SN БС соединение может быть чувствительно либо к микромобильности (SN FR2 в C1 и SN FR1 в C2), либо к макромобильности (SN FR2 в C2), либо не быть чувствительной ни к тому, ни к другому (SN LTE в C3). Поглощающее состояние «End on Session» (EoS) означает завершение сессии приложения и соответствует переходу ЦМ уровня I в «Idle», а поглощающее состояние «Outage» (O) для C1 соответствует разрыву RRC- соединения. На рис. 2.2 уровень II проиллюстрирован на примере приложения «Видео».

На *третьем уровне* для оценки длительности пребывания ПУ в состояниях RRC-Connected, RRC-Inactive и RRC-Idle использована базовая модель DRX из главы 1 в виде поглощающей ЦМ, где поглощающее состояние 0 соответствует разрыву RRC- соединения.

Метод анализа длительности пребывания ПУ в состояниях модели, различающихся энергопотреблением, изложен в разделе 1.2 и основан на фундаментальной матрице поглощающей ЦМ для оценки среднего числа попаданий в переходные состояния (формула 1.33). Далее трехуровневая модель состояний ПУ формализована, и доказаны утверждения, позволяющие провести расчеты искомым характеристикам ПУ.

Уровень I: исследуемые приложения.

На уровне I для оценки среднего числа сессий каждого приложения в течение RRC-соединения построена цепь Маркова $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\}$ с пространством состояний $\mathbb{Z}^{dual} = \{\text{Web, Gaming, Video, Phone, VR, Idle, End}\}$. Пять состояний ($N_{App} = 5$) моделируют сессии приложений из Табл. 2.1, состояние «Idle» — бездействие ПУ, пока пользователь не запустит очередное приложение, а поглощающее состояние «End» отражает завершение RRC-соединения. Каждая сессия моделируется попаданием в состояние k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$, а переключение между приложениями всегда проходит через «Idle». Время пребывания в состоянии k распределено экспоненциально со

средним значением $T_{A,k}$, согласованным с длительностью сессии (Табл. 2.1), $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$. Поглощающая ЦМ моделирует состояния ПУ на интервале наблюдения с поочередным запуском приложений. Вероятности переходов u_{ij}^{dual} в подматрице $\mathbf{U}^{dual} = [u_{ij}^{dual}]$, $i, j \in \{1, \dots, N_{App}, \text{Idle}\}$ до попадания в поглощающее состояние «End» с завершением интервала наблюдения настроены так, чтобы общая доля времени пребывания в каждом приложении и в состоянии «Idle» соответствовали заданной структуре трафика (Табл. 2.1). Компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}_{L1}^{dual} = (\pi_{L1,i}^{dual})_{i \in \mathbb{Z}^{dual}}$ начального распределения ЦМ $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\}$ могут быть записаны как

$$\pi_{L1,i}^{dual} = \begin{cases} 1, & i = \text{Idle}; \\ 0, & i \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{\text{Idle}\}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Утверждение 2.1. Вероятность запуска на ПУ k -го приложения, $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$, может быть вычислена через элементы $u_{\text{Idle},k}^{dual}$ подматрицы \mathbf{U}^{dual} переходных вероятностей ЦМ $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{dual}$ по формуле

$$u_{\text{Idle},k}^{dual} = p_{A,k} \frac{(T_{\text{Idle}} + T_{A,k})^{-1}}{\lambda_{\text{observ}} + (T_{\text{Idle}} + T_{A,k})^{-1}}, \quad k \in \{1, \dots, N_{App}\}, \quad (2.2)$$

где $p_{A,k}$ – условная вероятность при запуске приложения выбрать приложение k , $T_{A,k}$ – длительность сессии приложения k , T_{Idle} – длительность интервала переключения между приложениями, λ_{observ} – параметр экспоненциального распределения случайной длительности интервала наблюдения.

Доказательство. Заметим, что по предположению функциональной модели после завершения сессии приложения (выход из состояния k) ПУ всегда переходит в состояние переключения к следующему приложению (состояние «Idle»), поэтому $u_{kj} = 0$, $u_{k,\text{Idle}} = 1$, $k, j \in \{1, \dots, N_{App}\}$.

Выходы из состояния «Idle» возможны либо в состояние k с вероятностью $u_{\text{Idle},k}$ при запуске пользователем приложения k , либо в «End» с вероятностью $u_{\text{Idle},\text{End}}$ при завершении сессии приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$. Таким образом, с.в. ξ_{cycle} длительности интервала времени с момента попадания ЦМ в «Idle» до возвращения в это состояние можно моделировать

экспоненциальным распределением с параметром $(T_{Idle} + T_{A,k})^{-1}$, а ξ_{End} длительности интервала времени с момента попадания ЦМ в состояние «Idle» до завершения наблюдения – с параметром λ_{observ} . Для экспоненциально распределенных с.в. вероятность того, что первое событие произойдет раньше второго, имеет вид

$$P(\xi_{cycle} < \xi_{End}) = \frac{(T_{Idle} + T_{A,k})^{-1}}{\lambda_{observ} + (T_{Idle} + T_{A,k})^{-1}}.$$

Кроме того, известна условная вероятность $p_{A,k}$ выбора пользователем при запуске именно приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$, причем $\sum_{k=1}^{N_{App}} p_{A,k} = 1$. Тогда по закону Байеса вероятность запуска на ПУ k -го приложения определяется формулой

$$u_{Idle,k}^{dual} = p_{A,k} \cdot P(\xi_{cycle} < \xi_{End}) = p_{A,k} \frac{(T_{Idle} + T_{A,k})^{-1}}{\lambda_{observ} + (T_{Idle} + T_{A,k})^{-1}}.$$

Утверждение доказано.

Определив подматрицу \mathbf{U}^{dual} переходных вероятностей ЦМ $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{dual}$, из утверждения 2.1, можно вычислить среднее число сессий $n_{L1,k}^{dual}$ каждого приложения, $k = 1, \dots, N_{App}$, а также среднее число попаданий ПУ в состояние переключения Idle за время до разрыва RRC-соединения, используя формулу (1.33) при $\mathbb{A} = \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{\text{End}\}$:

$$n_{L1,j}^{dual} = \sum_{i \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{\text{End}\}} \pi_{L1,i}^{dual} d_{L1,ij}^{dual}, j \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{\text{End}\} = \{1, \dots, N_{App}, \text{Idle}\}. \quad (2.3)$$

Здесь $\pi_{L1,i}^{dual}$ – компоненты вектора начального распределения ЦМ $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\}$ по формуле (2.1), $d_{L1,ij}^{dual}$ – элементы фундаментальной матрицы $\mathbf{D}_{L1}^{dual} = (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{dual})^{-1}$, где \mathbf{I} — единичная матрица.

Уровень II: управление подключениями.

На уровне II модели для оценки времени подключения к MN и к SN БС в сценариях двойного подключения при запуске приложения с уровня I

построены три поглощающих ЦМ – по одной для каждого из рассмотренных сценариев:

$$\{v_n^{(1)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(1)} = \{MN, SN, MM, SM, O, EoS\} \text{ для } C1,$$

$$\{v_n^{(2)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(2)} = \{MN, SN, MM, SM, EoS\} \text{ для } C2,$$

$$\{v_n^{(3)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(3)} = \{MN, SN, MM, EoS\} \text{ для } C3.$$

Состояниями каждой ЦМ $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$, $m=1,2,3$, соответствуют режимам двойного подключения, где в качестве MN всегда используется БС NR FR2. Обозначения при построении пространств состояний $\mathbb{X}^{(m)}$, $m = 1,2,3$, и на рис. 2.2: «MN FR2» — основная БС; «SN» — резервная БС (SN FR2 в C1, SN FR1 в C2, SN LTE в C3). Состояния поиска луча после микромобильности обозначены как «MM» = «MN MM» (во всех сценариях) и «SM» = «SN MM» (в C1 и C2). Состояние блокировки прямой видимости с обеими БС обозначено «O» (Outage) и учитывается только в C1, где обе FR2-БС чувствительны к макромобильности; оно соответствует разрыву RRC-соединения до завершения сессии приложения. Поглощающее состояние успешного завершения сессии обозначено «EoS» и соответствует переходу ЦМ уровня I в состояние «Idle».

Во всех сценариях ПУ сначала подключается к MN FR2, поэтому для каждой ЦМ $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$, моделирующей состояние RRC-соединения, компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}_{L2}^{(m)} = \left(\pi_{L2,i}^{(m)} \right)_{i \in \mathbb{X}^{(m)}}$, $m = 1,2,3$, начального распределения на уровне II имеют вид

$$\pi_{L2,i}^{(m)} = \begin{cases} 1, & i = MN; \\ 0, & i \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{MN\}. \end{cases} \quad (2.4)$$

В модели ПУ переключается на SN при блокировке прямой видимости до MN. Поскольку MN и SN — ближайшие к ПУ БС, при независимости блокировок вероятность p_N того, что обе БС одновременно заблокированы, определяется по формуле (1.25):

$$p_N = p_{N,1}p_{N,2}, \quad (2.5)$$

где $p_{N,i}$ определяются формулами (1.26) -(1.27):

$$p_{N,i} = 1 - 2 \int_0^\infty \frac{(\pi\lambda_A)^i}{(i-1)!} x^{2i-1} e^{-\pi\lambda_A x^2} \left(1 - e^{-2xr_B\lambda_B \frac{h_B-h_U}{h_A-h_U}} \right) dx, \quad i = 1,2,$$

с параметрами модели макромобильности, определенными в разделе 1.1.

Считаем, что длительность $T_{A,k}$ сессии запущенного на ПУ приложения k распределена экспоненциально с плотностью

$$f_{T_{A,k}}(t) = T_{A,k}^{-1} e^{-T_{A,k}^{-1}t}, \quad k = 1, \dots, N_{app}. \quad (2.6)$$

Плотность распределения интервала $T_{L2,i}$ до события блокировки прямой видимости с i -й БС определяется по формуле (1.18):

$$f_{T_{L2,i}}^{dual}(t) = \gamma(x(i)) e^{-\gamma(x(i))t}, \quad i = 1,2, \quad (2.7)$$

а плотность распределения длительности $T_{NL2,i}$ интервала блокировки прямой видимости с i -й БС – по формуле (1.20)

$$f_{T_{NL2,i}}^{dual}(t) = \sigma(x(i))^{-1} e^{-\sigma(x(i))^{-1}t}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.8)$$

где $\gamma(x(i))$ – интенсивность наступления интервала блокировки прямой видимости, а $\sigma(x(i))$ – интенсивность наступления интервала прямой видимости между ПУ и i -й БС, находящейся на случайном 2D расстоянии $x(i)$, одним или несколькими блокаторами. Здесь $\gamma(x(i))$ задана формулой (1.14), $\sigma(x(i))$ – формулой (1.19), а плотность $f_i(x)$ распределения 2D расстояния $x(i)$ – формулой (1.27).

Утверждение 2.2. Для сценария m среднее число $n_{L2,j}^{(m)}$ посещений ЦМ уровня $\Pi \{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$, $m = 1,2,3$, состояния j вычисляется по формуле

$$n_{L2,j}^{(m)} = \sum_{i \in \mathbb{X}^{(m)}} \pi_{L2,j}^{(m)} d_{L2,ij}^{(m)}, \quad j \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}, \quad (2.9)$$

где элементы $d_{L2,ij}^{(m)}$ фундаментальной матрицы $\mathbf{D}_{L2}^{(m)} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q}^{(m)})^{-1}$ могут быть найдены с использованием подматрицы $\mathbf{Q}^{(m)} = [q_{ij}^{(m)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}}$ переходных вероятностей ЦМ, описывающей процесс до выхода из множества

переходных состояний $\mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}$, \mathbf{I} — единичная матрица соответствующей размерности, а начальное распределение $\pi_{L2,j}^{(m)}$ ЦМ определено формулой (2.4).

Доказательство. Элементы подматрицы $\mathbf{Q}^{(m)}$ переходных вероятностей определяются вероятностью того, что целевое событие наступит раньше остальных. Например, для перехода из «MN» в «MM» происходит, если интервал до события микромобильности (с плотностью $f_{T_A}(y)$) меньше интервалов до блокировки прямой видимости с основной БС ($f_{T_{L2,1}}(x)$) и до завершения сессии приложения k ($f_{T_{A,k}}(x)$). Иными словами, процедура поиска луча инициируется до появления блокатора и окончания сессии.

Это означает, что для сценария С1 искомые вероятности в матрице $\mathbf{Q}^{(1)} = [q_{ij}^{(1)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(1)} \setminus \{EoS\}}$ для $\mathbb{X}^{(1)} \setminus \{EoS\} = \{MN, SN, MM, SM, O\}$ могут быть вычислены по формулам

$$\begin{aligned}
 q_{MN,MM}^{(1)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_A}(y) f_{T_{L2,1}}^{dual}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\
 q_{MM,MN}^{(1)} &= q_{MM,SM}^{(1)} = 1, q_{MN,O}^{(1)} = p_N, \\
 q_{MN,SN}^{(1)} &= (1 - p_{N,2}) \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{L2,1}}^{dual}(y) f_{T_A}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\
 q_{SN,MN}^{(1)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{NL2,1}}^{dual}(y) f_{T_A}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\
 q_{SN,SM}^{(1)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_A}(y) f_{T_{L2,2}}^{dual}(x) f_{T_{NL2,1}}^{dual}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\
 q_{O,MN}^{(1)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{NL2,1}}^{dual}(y) f_{T_{NL2,2}}^{dual}(x) dx dy, \\
 q_{SN,O}^{(1)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{L2,2}}^{dual}(y) f_{T_A}(x) f_{T_{NL2,1}}^{dual}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy,
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

$$q_{O,SN}^{(1)} = \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{NL2,2}}^{dual}(y) f_{T_{NL2,1}}^{dual}(x) dx dy.$$

Поскольку в сценарии С2 соединение ПУ с резервной БС SN FR1 не чувствительно к макромобильности, т. е. при появлении блокатора на линии прямой видимости разрыва RRC-соединения не происходит, пространство состояний $\mathbb{X}^{(2)} \setminus \{EoS\} = \{MN, SN, MM, SM\}$ не содержит состояние "O". Это означает, что искомые вероятности в матрице $\mathbf{Q}^{(2)} = [q_{ij}^{(2)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(2)} \setminus \{EoS\}}$ могут быть вычислены по формулам

$$\begin{aligned} q_{MN,SN}^{(2)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{L2,1}}^{dual}(y) f_{T_A}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\ q_{SN,MN}^{(2)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{NL2,1}}^{dual}(y) f_{T_A}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\ q_{SN,SM}^{(2)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_A}(y) f_{T_{NL2,1}}^{dual}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Вероятности $q_{MN,MM}^{(2)}$, $q_{MM,MN}^{(2)}$, $q_{SM,SN}^{(2)}$ вычисляются так же, как в формуле (2.10).

В сценарии С3 ЦМ еще более упрощается: так как соединение ПУ с резервной БС SN LTE не чувствительно к микро- и макромобильности, пространство состояний $\mathbb{X}^{(3)} \setminus \{EoS\} = \{MN, SN, MM\}$ не содержит состояние «SM». Вероятности в матрице $\mathbf{Q}^{(3)} = [q_{ij}^{(3)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(3)} \setminus \{EoS\}}$ могут быть вычислены по формулам

$$\begin{aligned} q_{MN,SN}^{(3)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{L2,1}}^{dual}(y) f_{T_A}(x) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \\ q_{SN,MN}^{(3)} &= \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} f_{T_{NL2,1}}^{dual}(y) f_{T_{A,k}}(x) dx dy, \end{aligned} \quad (2.12)$$

вероятности $q_{MN,MM}^{(3)}$, $q_{MM,MN}^{(3)}$ вычисляются так же, как в формуле (2.10).

Формулы (2.10)-(2.12) для элементов матрицы $\mathbf{Q}^{(m)} = [q_{ij}^{(m)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}}$ позволяют найти элементы $d_{ij}^{(m)}$ фундаментальной матрицы $\mathbf{D}^{(m)} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q}^{(m)})^{-1}$. Тогда из (1.33) среднее число посещений ЦМ уровня II $\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)}$, $m = 1, 2, 3$, состояния j определяется формулой (2.9).

Утверждение доказано.

Уровень III: энергопотребление механизма DRX

На уровне III для оценки времени, проведенного ПУ в состояниях трех режимов RRC-соединения, использована поглощающая ЦМ $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$, совпадающая с построенной в главе 1 при механизма DRX ЦМ $\{\eta_n^{base}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{base}$. Пространство состояний $\mathbb{Y}^{dual} = \{0, 1, \dots, 7\}$ состоит из 7 переходных и одного поглощающего состояния «0» (рис. 2.2). Режим RRC-Connected моделируется состояниями 1–5: передачи данных (состояние 1), проверка DCI в «On Duration» (состояния 2 и 4), и последующие интервалы короткого или длинного сна DRX (состояния 3 и 5). В режимах RRC-Inactive и RRC-Idle ПУ использует пейджинг для экономии энергии. Цикл пейджинга чередует интервалы «РС» между сообщениями пейджинга (состояние 6) и «РС Occasion» получения сообщения пейджинга (состояние 7), которое позволяет определить, нужно ли ПУ переключиться в режим RRC-Connected.

Состояние 0 моделирует разрыв RRC-соединения (Connection Release), вызванный в результате макромобильности (блокировки прямой видимости до опорной БС в сценарии C1, соответствует состоянию «O» ЦМ II уровня), в результате микромобильности (рассогласование лучей ПУ и опорной БС, соответствует состояниям «MM» или «SM» ЦМ II уровня), в результате завершения сессии приложения k (состояние «Idle» ЦМ I уровня). Пользуясь подходом главы 1 по аналогии с формулой (1.36) плотность $f_{C,i,k}^{dual}(t)$ распределения длительности RRC-соединения ПУ с i -й БС для сценария C1 уровня II может быть найдена как плотность распределения минимальной из вышеупомянутых случайных величин:

$$f_{C,i,k}^{dual}(t) = \sum_{\substack{\forall m,j,l \in \{T_{L2,i}; \tilde{T}_A; T_{A,k}\}, \\ m \neq j \neq l}} f_m(t) [1 - F_j(t)][1 - F_l(t)], \quad (2.13)$$

где $f_{T_{L2,i}}(t)$ и $F_{T_{L2,i}}(t)$ плотность и функция экспоненциального распределения длительности интервала до наступления события блокировки прямой видимости с i -й БС (2.7) с параметром (1.14), $f_{\tilde{T}_A}(t)$ и $F_{\tilde{T}_A}(t)$ – до события микромобильности (1.8) с параметром (1.13), $f_{T_{A,k}}(t)$ и $F_{T_{A,k}}(t)$ – до события завершения пользователем сессии приложения k с параметром $T_{A,k}^{-1}$, $k = 1, \dots, N_{App}$. При этом для сценариев С2 и С3 в (2.13) исключаются сомножители, отвечающие за неактуальные для FR1 и LTE эффекты.

В предположении о начале режима RRC-соединения с состояния передачи данных для ЦМ $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$, моделирующей состояние ПУ с точки зрения механизма DRX, компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}_{L3}^{dual} = (\pi_{L3,i}^{dual})_{i \in \mathbb{Y}^{dual}}$ начального распределения ЦМ $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\}$ могут быть записаны как

$$\pi_{L3,i}^{dual} = \begin{cases} 1, & i = 1; \\ 0, & i \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{1\}. \end{cases} \quad (2.14)$$

Вероятности переходов поглощающей ЦМ уровня III $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$ получены с применением подхода главы 1 для произвольной i -й БС в качестве опорной, $i = 1, \dots, N$, и произвольного приложения k , $k = 1, \dots, N_{App}$. Петля из состояния 1 в состояние 1 возможна, если по истечении таймера бездействия процедура «On Duration» обнаруживает данные для передачи (начало интервала $T_{O,k}$ активной передачи данных приложения k), и при этом не произойдет ни потери связи с i -й БС из-за микро-/ макромобильности, ни завершения приложения k на ПУ, что приводит к следующим результатам:

$$w_{11}^{dual} = \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{O,k}(x) dx \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{C,i,k}^{dual}(y) dy. \quad (2.15)$$

где $f_{O,k}(t) = \lambda_{O,k} e^{-\lambda_{O,k}t}$ плотность экспоненциального с параметром $\lambda_{O,k}$ распределения длительности интервала активной передачи пользовательских

данных приложения k , $f_{C,i,k}^{dual}(t)$ плотность распределения длительности RRC-соединения ПУ с i -й БС по (2.13), $i = 1, \dots, N$, $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$.

Далее по аналогии с главой 1 можно вычислить остальные переходные вероятности, являющиеся элементами подматрицы $\mathbf{W}^{dual} = [w_{ij}^{dual}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}}$, $\mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\} = \{1, \dots, 7\}$, как показано в Приложении 2. Матрица \mathbf{W}^{dual} позволяет найти элементы $d_{L3,ij}^{dual}$ фундаментальной матрицы $\mathbf{D}_{L3}^{dual} = (\mathbf{I} - \mathbf{W}^{dual})^{-1}$. Тогда из (1.33) среднее число посещений ЦМ уровня III $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$ состояния j определяется аналогично (2.3) и (2.9), используя формулу (1.33) при $\mathbb{A} = \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}$:

$$n_{L3,j}^{dual} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}} \pi_{L3,i}^{dual} d_{L3,ij}^{dual}, \quad j \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}, \quad (2.16)$$

где компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}_{L3}^{dual} = (\pi_{L3,i}^{dual})_{i \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}}$ начального распределения ЦМ уровня III $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$ определяются (2.15).

Результаты утверждений раздела 2.2 использованы при численном анализе характеристик энергоэффективности, энергопотребления и времени работы батареи в следующем разделе 2.3 диссертационной работы.

2.3 Численный анализ характеристик сценариев двойного подключения

Основными интересующими метриками являются энергопотребление P_C^{dual} за интервал наблюдения по (2.21), энергоэффективность $P_{E,i}^{dual}$ по (1.23) и (2.23) и время работы батареи $B_{T,i}^{dual}$ по (1.24) и (2.24). Для численного анализа использованы близкие к реальным исходным данным из [87], [126], [128], собранные в Табл. 2.3.

Таблица 2.3. Численные значения параметров модели двойного подключения

Обозначение	Описание	Значение (FR2/FR1/LTE)
λ_A	Плотность расположения БС, м^{-2}	$10^{-4}/10^{-5}/10^{-6}$
r_B, h_B	Радиус и высота блокатора, м	0.4, 1.7

v_B	Скорость блокатора, м/с	1
h_U, h_A	Высота ПУ и БС, м	1.5; 4/10/20
P_T	Излучаемая мощность БС, Вт	2/10/40
G_A	Коэффициент усиления передающей антенны,	17.6 /14.6 /2.6
G_U	Коэффициент усиления принимающей антенны	5.6/2.6/-0.46
ζ	Коэффициент затухания сигнала в условиях прямой видимости между ПУ и БС	2.1
I_M	Граница затухания сигнала, дБ	3
δ	Время переключения антенной решетки, с	10
N_T	Число антенных элементов ФАР БС	16x4 /8x4 /2x2
N_U	Число антенных элементов ФАР ПУ	4x4 / 2x2/1x1
f_c	Несущая частота, ГГц	28/ 3.5 /1.9
N_0	Шум, дБ	-84
$\Delta x, \Delta y$	Средняя скорость смещения, см/с	3, 3
t_I, t_{on}	Таймер бездействия и длительность процедуры «On Duration», мс	4, 2
t_{SS}, t_{LS}	Таймеры периодов короткого и длинного сна, мс	8, 32
T_{DRX}	Длительность цикла пейджинга DRX, мс	320
n_{SS}, n_{LS}	Число коротких и длинных периодов сна	3, 2
T_{BFI}	Максимальное число неудачных попыток поиска луча	2
P_U	Единица мощности, мВт	40
B_C, B_V	Емкость, А·ч, и напряжение, В, батареи	5 А·ч, 3.8 В

Таблица 2.4. Энергопотребление ПУ (ед. мощности/слот) [46, 67].

Состояние ЦМ	Обозначение	Описание	FR2	FR1	LTE
0	e_{SSB}	Обнаружение SSB	175	100	100

0	$e_{CB-RACH}$	Процедура Contention-Based Random Access (CBRA)	376.5	376.5	376.5
0	$e_{CF-RACH}$	Процедура Contention-Free Random Access (CFRA)	175	100	-
6, 7	e_{idle}	RRC-Idle	1	1	1
1	e_A	Прием сигнальной информации PDCCH и пользовательских данных в канале PDSCH	350	300	120
3, 5, 7	e_{ON-X}	«On Duration», Paging	61	61	50
2	e_{SS}	Короткий сон DRX	45	45	45
4	e_{LS}	Длинный сон DRX	20	20	20
6, 7	e_I	RRC-Inactive	1	1	-

Лемма 2.1. Энергопотребление $P_{C,L1,k}^{dual}$ для приложения k в течение интервала наблюдения вычисляется по формуле

$$P_{C,L1,k}^{dual} = n_{L1,k}^{dual} T_{A,k} \sum_{i \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}} n_{L2,i}^{dual} P_{C,L2,i}^{dual}, \quad m = 1, 2, 3, \quad (2.17)$$

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

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

Доказательство. Суммарное энергопотребление на уровне III ЦМ рассчитывается как сумма энергопотребления для установления RRC-соединения ($e_{RACH} + e_{SSB}$) и энергопотребления в состояниях цепи DRX по формуле

$$P_{C,L3}^{dual} = e_{RACH} + e_{SSB} + \sum_{j \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}} n_{L3,j}^{dual} e_j, \quad (2.18)$$

где e_j — это константы энергопотребления, приведенные в Таблице 2.4.

Суммарное энергопотребление на уровне II ЦМ для приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{app}\}$, в соединениях с опорными базовыми станциями MN и SN определяется как произведение среднего времени соединения через базовую станцию и энергопотребления, найденного в (2.18), то есть

$$P_{C,L2,k,MN}^{dual} = P_{C,L3}^{dual} \int_0^{\infty} t f_{C,1,k}^{dual}(t) dt, \quad (2.19)$$

$$P_{C,L2,k,SN}^{dual} = P_{C,L3}^{dual} \int_0^{\infty} t f_{C,2,k}^{dual}(t) dt.$$

Энергопотребление для выравнивания лучей антенн ПУ и БС вследствие микромобильности с основной и резервной БС «ММ» и «SM» для любого приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{app}\}$, рассчитывается как

$$P_{C,L2,k,MM}^{dual} = P_{C,L2,k,SM}^{dual} = T_{BFI} e_{ON} + e_{RACH} + e_{SSB}, \quad (2.20)$$

где T_{BFI} — максимальное значение числа последовательных неудачных попыток поиска луча (Beamforming Feedback Indicator, BFI), после которого запускается процедура управления лучом для выравнивания лучей антенн ПУ и БС.

Наконец, энергопотребление ПУ в условиях блокировки прямой видимости с обеими БС (состояние «O» = «Outage») для любого приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{app}\}$, определяется с помощью константы e_{idle} вместе со средним временем блокировки и энергопотреблением при попытке восстановления после рассогласования лучей:

$$P_{C,L2,k,O}^{dual} = T_{BFI} e_{ON} + e_{RACH} + e_{SSB} + e_{idle} \int_0^{\infty} t \left[f_{TNL,1}^{dual}(t) \left(1 - F_{TNL,2}^{dual}(t) \right) + f_{TNL,2}^{dual}(t) \left(1 - F_{TNL,1}^{dual}(t) \right) \right] dt. \quad (2.21)$$

Заметим, что среднее число $n_{L1,j}^{dual}$ посещений состояния j , $j \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{\text{End}\}$, в формуле (2.3) определено для интервала наблюдения за ПУ, имеющего экспоненциальное распределение с параметром λ_{observ} (см. Утверждение 2.1).

Таким образом определены все слагаемые формулы (2.17) суммарного энергопотребления $P_{C,L1,k}^{dual}$ ПУ для приложения k , $k \in \{1, \dots, N_{app}\}$.

Лемма доказана.

Теперь найдем энергопотребление P_C^{dual} в течение интервала наблюдения с помощью ЦМ уровня I $\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{dual}$.

Утверждение 2.3. Энергопотребление P_C^{dual} для сценария двойного подключения может быть оценено по формуле

$$P_C^{dual} = n_{L1,Idle}^{dual} e_{Idle} T_{Idle} + \sum_{k=1}^{N_{App}} n_{L1,k}^{dual} T_{A,k} \sum_{i \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}} n_{L2,i}^{dual} P_{C,L2,i}^{dual}, \quad m \quad (2.22)$$

$$= 1,2,3,$$

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

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

Доказательство. Опираясь на определение энергопотребления P_C (1.22), следуя подходу доказательства формулы (2.21) и используя для среднего числа $n_{L1,j}^{dual}$, $j \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus \{End\}$, и $n_{L2,j}^{dual}$, $j \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}$, посещений состояния j формулы (2.3) и (2.9), получаем

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

Формула (2.22) учитывает интервалы простоя, когда после разрыва RRC-соединения энергия тратится на процедуру первичного подключения к сети, включая поиск луча.

Утверждение доказано.

Средняя спектральная эффективность при взаимодействии с i -й БС может быть оценена с использованием теоремы Шеннона-Хартли [127]:

$$E[S_{E,i}^{dual}] = \int_0^{\infty} \log_2 \left(1 + S(f_i(x)) \right) f_i(x) dx, \quad (2.23)$$

где $S(\cdot)$ — отношение сигнал-шум, определенное формулой (1.4), $f_i(x)$ — функция плотности 2D расстояния $x(i)$ до i -й БС, определенная формулой (1.27).

Это позволяет оценить энергоэффективность как

$$P_E^{dual} = \sum_{k=1}^{N_{App}} p_{A,k} \frac{E[S_{E,1}^{dual}] n_{L2,MN}^{dual} T_{C,1,k}^{dual} + E[S_{E,2}^{dual}] n_{L2,SN}^{dual} T_{C,2,k}^{dual}}{T_{A,k}}, \quad (2.24)$$

где $T_{C,i,k}^{dual} = \int_0^{\infty} t f_{C,i,k}^{dual}(t) dt$ — средняя продолжительность RRC-соединения с i -й БС, определенная формулой (2.14), $p_{A,k}$ — условная вероятность при запуске приложения выбрать приложение k , $k \in \{1, \dots, N_{App}\}$.

Наконец, мы получаем среднее время работы батареи:

$$E[B_T^{dual}] = \frac{B_C[A \cdot \text{ч}]B_V[B]}{P_C^{dual}[\text{Вт}]}, \quad (2.25)$$

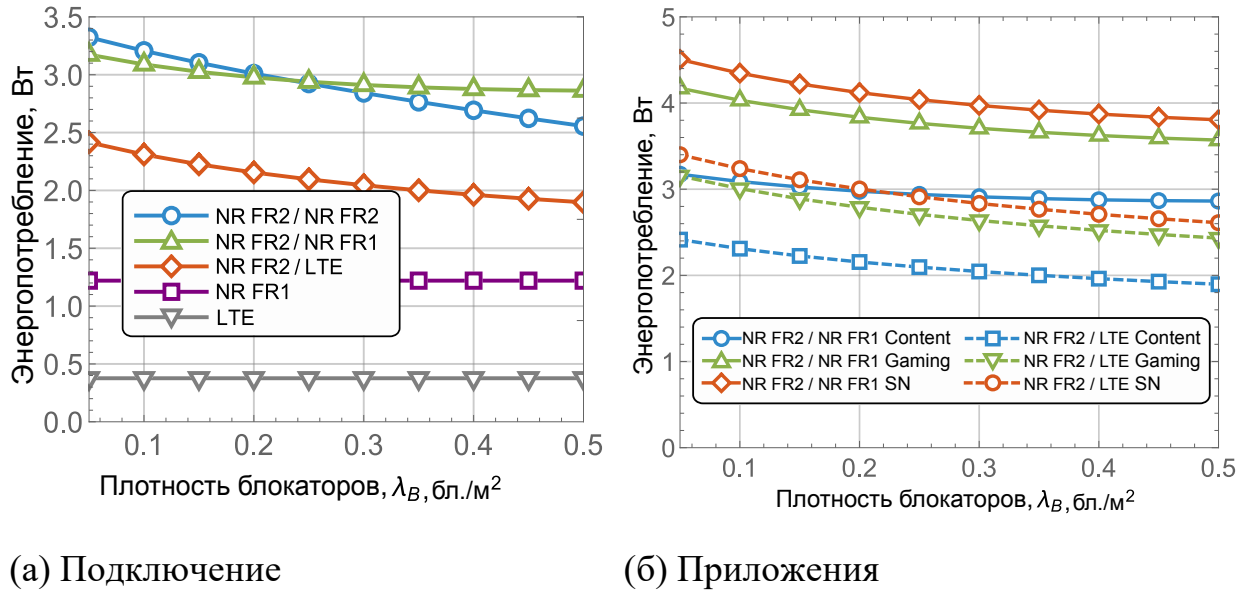
где B_C — емкость батареи, а B_V — напряжение.

В формуле (2.25) энергопотребление P_C^{dual} измеряется в ваттах. Таким образом, чтобы использовать значения из Табл. 2.3, необходимо преобразовать единицы измерения мощности. Значения для NR FR2 и FR1 выбраны на основе модели энергопотребления ПУ 3GPP [46], а для энергопотребления LTE — [67]. Для уточнения параметров модели можно также использовать [95], [118].

Анализ влияния плотности блокаторов на энергопотребление при потреблении контента (рис. 2.3(a)) показывает: 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 C2, наименьшее потребление — у C3. Объяснение в том, что с ростом плотности блокаторов переключение на резервную БС происходит чаще, активнее используются БС NR FR1 или LTE μ Wave, при этом энергопотребление LTE значительно ниже, чем NR FR1.

В сценарии C2 повышение плотности блокаторов приводит к более частым перебоям в работе MN БС FR2, что требует дополнительных энергозатрат для процедур управления лучом. В сценарии C3 наблюдаемая тенденция определяется более низким энергопотреблением интерфейса LTE по сравнению с NR FR1 в условиях высокой плотности сети. Абсолютная разница значений энергопотребления между C1 и C3 при $\lambda_B = 0,5 \text{ Вт/м}^2$ достигает 1,5 Вт, что должно негативно сказаться на времени работы батареи. Однако в сценарии C1 это компенсируется более высокими суммарными

скоростями передачи данных, достигаемыми в mmWave. В отличие от сценариев С2 и С3, обеспечивающих надежное соединение за счет резервирования на μ Wave, одновременная блокировка обеих БС в сценарии С1 с mmWave приводит к перебоям в работе ПУ.



(а) Подключение

(б) Приложения

Рис. 2.3. Энергопотребление в зависимости от плотности блокаторов

На рис. 2.3(а) для сценария С3 наблюдается незначительное снижение энергопотребления с ростом плотности блокаторов. Это связано с тем, что резервная БС LTE без ресурсоемкого отслеживания луча потребляет меньше энергии, чем NR, и при росте плотности блокаторов ПУ больше времени проводит в подключении к LTE, снижая общее энергопотребление.

Сравнение значений энергопотребления для различных приложений, представленных в Таблице 2.1, показано на рис. 2.3(б) для сценариев С2 и С3 в зависимости от плотности блокаторов λ_B . Качественное поведение кривых одинаково, отличия в значениях энергопотребления объясняются структурой трафика (Табл. 2.1) и характеристиками микромобильности (Табл. 2.2). Наименьшее энергопотребление характерно для потребления контента: преобладает веб-браузинг 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 ($\sim 0,2$ Вт) определяется сочетанием трафика и микромобильности: в играх доминируют мобильные приложения со скоростью $0,3^\circ/\text{с}$, в соцсетях — VR со скоростью $0,2^\circ/\text{с}$, но с более высокими требованиями к скорости передачи данных. Эта разница может возрасти при использовании приложений с более высокой микромобильностью.

Далее рассмотрим энергоэффективность. При сравнении вариантов двойного подключения только для NR, представленных на рис. 2.4, наилучшая энергоэффективность наблюдается для сценария С2. Следует отметить, что полоса пропускания резервной БС в диапазоне FR2 обычно шире, чем в FR1, при этом процедуры управления лучом для обоих диапазонов схожи. Однако сценарий С1 в целом менее энергоэффективен из-за ненадёжности резервной БС FR2 (допускающей разрыв RRC-соединения) и более крупных антенных решёток на стороне БС (табл. 2.3), требующих больших затрат энергии при управлении лучом. Тем не менее, практическая разница составляет всего 2–4 бит/Гц/Вт (рис. 2.4(a)). С другой стороны, сценарий С3 (двойное подключение с резервной БС LTE) демонстрирует значительно худшую энергоэффективность по сравнению с С1 и С2: разница достигает 30–40% при малой плотности блокаторов (18 бит/Гц/Вт против 24–28 бит/Гц/Вт) и снижается до $\sim 10\%$ по мере её роста.

Исходя из полученных результатов рекомендуется сценарий С3 для чувствительных к перебоям приложений с низким трафиком, а С1 — для нечувствительных к перебоям приложений с интенсивным трафиком. Сценарий С2 подходит для чувствительных к перебоям приложений при перегрузке БС LTE или интенсивном трафике, например, при преобладании требовательных к скорости приложений VR/AR.

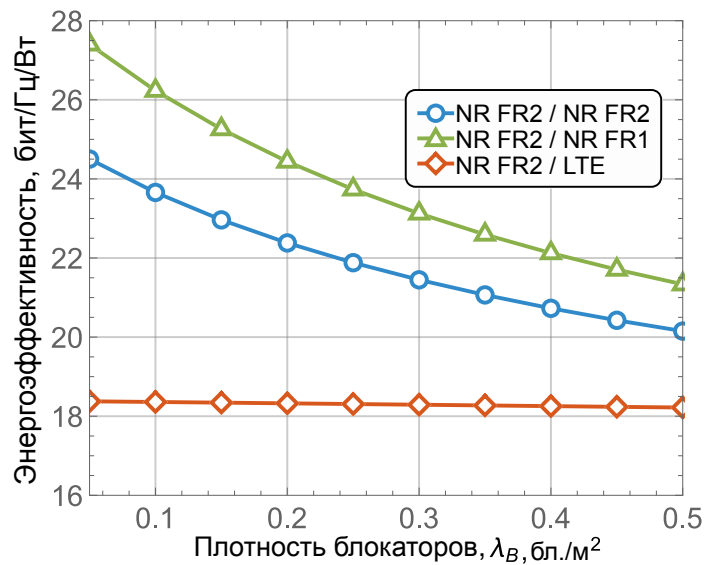
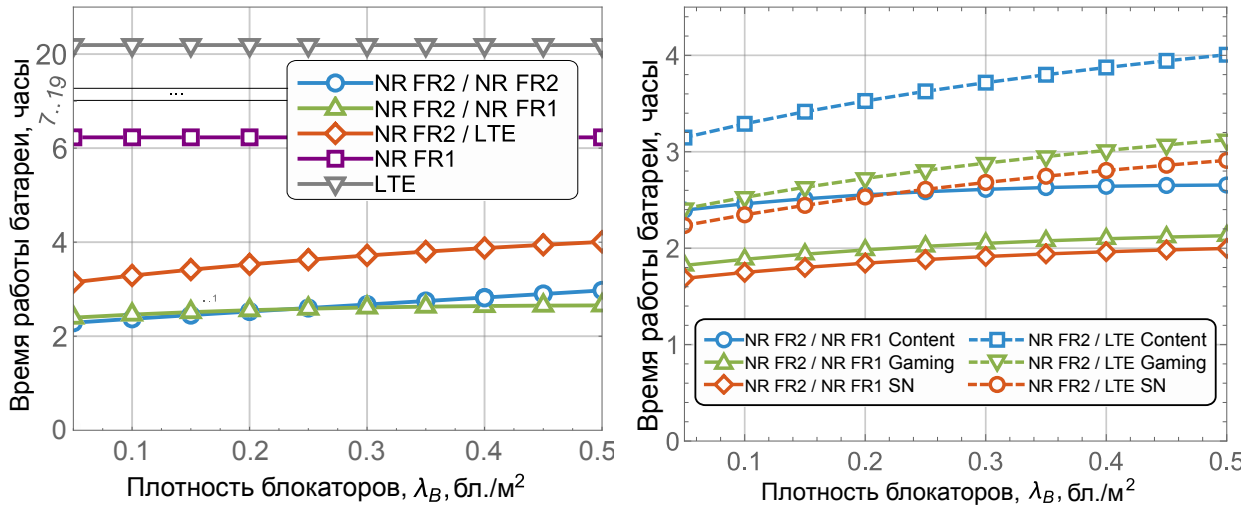


Рис. 2.4. Энергоэффективность в зависимости от плотности блокаторов и БС.

Теперь рассмотрим время работы батареи в зависимости от плотности блокаторов (рис. 2.5). На рис. 2.5 (а) (трафик «Потребление контента») наибольшее время автономной работы обеспечивает одиночное подключение «только LTE», второе место — у «только NR FR1». Разница до 15 часов объясняется отсутствием микромобильности и меньшим энергопотреблением LTE по сравнению с NR FR1. Среди вариантов двойного подключения наилучшие результаты у сценария С3: время работы батареи растёт с 3,5 до 4 ч при увеличении плотности блокаторов с 0 до 0,5 бл./м², так как высокая вероятность потери связи с NR FR2 вынуждает ПУ чаще использовать энергоэффективный интерфейс LTE. Для сценариев С1 и С2 время автономной работы практически не зависит от плотности блокаторов. Результаты на рис. 2.5(б) для моделей использования «Игры» и «Социальные сети» показывают качественно схожее поведение, но меньшее время работы батареи из-за высокой микромобильности ПУ и нагрузки трафика. В зависимости от приложения время работы батареи может отличаться примерно на 1 час.



(а) Подключения

(б) Приложения

Рис. 2.5. Время работы батареи в зависимости от плотности блокаторов.

На основе анализа времени работы батареи для приложений, чувствительных к перебоям в трафике, рекомендуется сценарий С3 двойного подключения, а для нечувствительных – С1. Сценарий С2 подходит для приложений, чувствительных к перебоям, при перегрузке сети LTE или интенсивной микромобильности, например, для VR/AR. Выбор стратегии двойного подключения тесно связан с качеством обслуживания. В диапазонах FR1 и FR2 на QoS приложений негативно влияют макро- и микромобильность, а в FR1 и LTE – ограниченная пропускная способность. Разработанная модель может стать основой для внедрения недавно стандартизированных механизмов энергосбережения 5G NR, включая сигнал пробуждения (WUS) и механизм релаксации RRM.

ГЛАВА 3. Энергоэффективность пользовательских устройств в сетях 5G «Промышленный интернет вещей»

Одна из ключевых областей применения приложений AR/VR/XR — промышленная автоматизация. Для повышения энергоэффективности консорциум 3GPP стандартизировал устройства RedCap (Reduced Capability), подходящие для промышленного интернета вещей [52]. Технология RedCap поддерживает усовершенствования поверх стандартного DRX: сигнал пробуждения (WUS) и релаксацию управления радиоресурсами (RRM Relaxation). В главе 3 проведено сравнительное исследование DRX с этими усовершенствованиями в условиях, приближенных к реальным: для ПУ RedCap при подключении к одной БС 5G исследованы 4 схемы энергосбережения на основе различных комбинаций трёх механизмов — DRX, WUS и RRM-релаксации (рис. 3.1) [4].

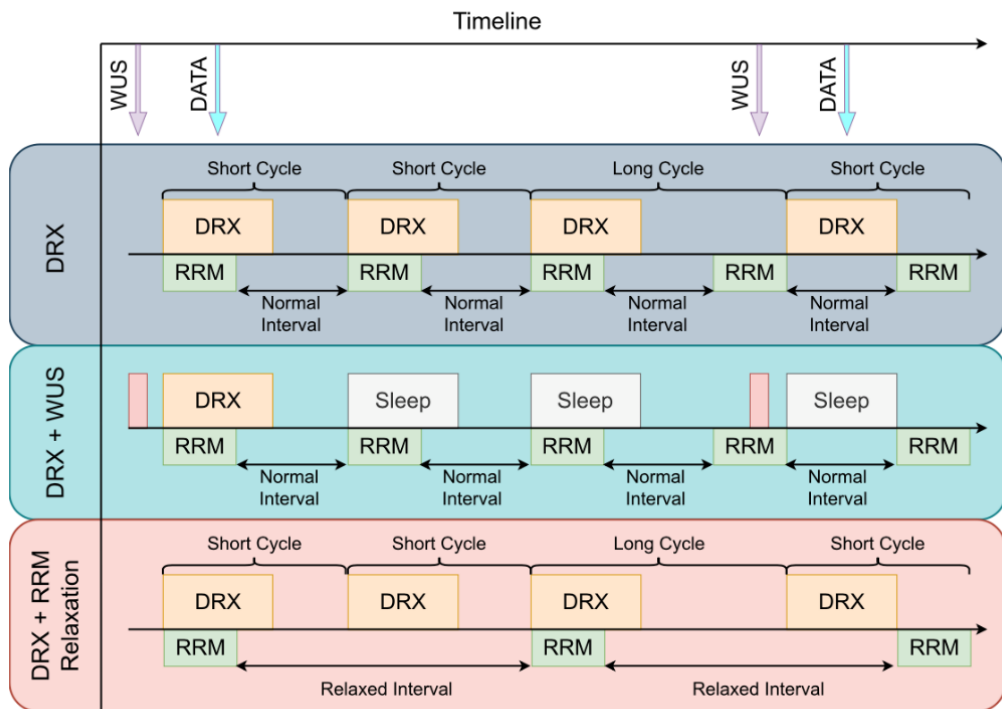


Рис. 3.1. Сравнение схем на основе комбинации механизмов энергосбережения.

Базовая схема «DRX», которая использована в качестве бенчмарка, и 3 схемы энергосбережения при комбинации детально описанных в разделе 1.1 работы механизмов DRX, WUS и RRM-релаксации определены ниже.

1. Схема «DRX». Это базовая схема энергосбережения, используемая по умолчанию для ПУ с полной функциональностью и для ПУ с урезанной функциональностью RedCap.
2. Схема «DRX + WUS». Сигнал WUS, характеризующийся низким энергопотреблением, синхронизирован с циклами механизма DRX: если сигнал WUS не обнаружен в строго определенный интервал перед началом цикла DRX, в ближайшем цикле DRX ПУ не выходит из режима сна для мониторинга индикатора DCI. Таким образом, можно достичь большего энергосбережения за счет пропуска процедуры «On Duration».
3. Схема «DRX + RRM-релаксация». Помимо мониторинга DCI в PDCCH, ПУ также необходимо отслеживать сигналы RSRP/RSRQ. В режиме RRM-релаксации наблюдение за этими сигналами пропускаются, что обеспечивает экономию энергии для ПУ с низкой мобильностью.
4. Схема «DRX + WUS + RRM-релаксация». Объединяет все три механизма энергосбережения. Эта схема не обязательно окажется оптимальной, поскольку энергоэффективность будет зависеть от мобильности и местоположения ПУ.

В качестве интересных приложений из Табл. 2.1 выбраны расширенная виртуальная реальность (X-VR) и веб-серфинг (web-browsing), относящиеся к разным категориям трафика и различающиеся характеристиками поведения пользователя (Табл. 2.2).

3.1 Системная модель подключения пользовательского устройства с урезанной функциональностью

Анализ энергоэффективности ПУ RedCap проведен для промышленной автоматизации, — ключевой области применения рассматриваемых приложений. В качестве ключевого выбрано приложение расширенной

виртуальной реальности X-VR. Запускаемые на автономных ПУ с ограниченной батареей, такие приложения требуют высокой энергоэффективности и низких задержек беспроводного интерфейса. Перемещение пользователя с устройством X-VR затрудняет поддержание требуемого уровня QoS. Для сравнения исследовано приложение веб-серфинга с низкой микромобильностью, допускающее более низкие скорости передачи данных.

Уточнение модели развертывания

Зона покрытия БС представляет собой типовое производственное помещение квадратной формы с длиной стороны L м, в котором перемещаются пользователи с ПУ RedCap (например, VR очки), поддерживающими одну или несколько технологий энергосбережения, включая комбинации DRX, WUS и RRM-релаксации, для получения услуг приложений X-VR и веб-серфинг. На рис. 3.2 БС NR в диапазоне mmWave расположена в точке $(0,0)$, а пользователь, желтый человечек, находился в точке $(x(t_0), y(t_0))$ в момент времени t_0 и переместился в точку $(x(t_1), y(t_1))$ в момент времени t_1 . Фазовые центры антенн ПУ и БС расположены на высоте h_U и h_A соответственно, $h_U < h_A$.

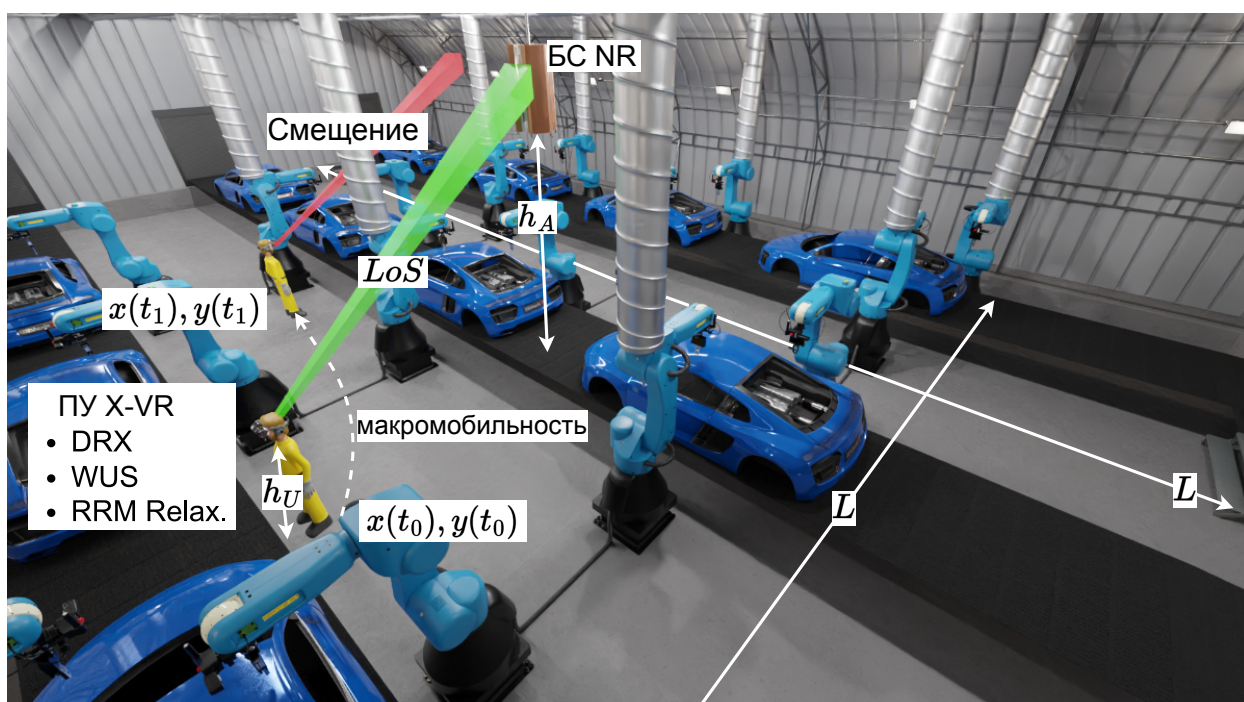


Рис. 3.2. Системная модель подключения ПУ RedCap

Модели антенной решетки, микромобильности, поиска луча и механизмы энергосбережения описаны в главе 1. Модель макромобильности построена ниже в виде комбинации двух одномерных диффузионных процессов.

Уточнение модели блокировки

Прямая видимость может перекрываться специализированным оборудованием в производственном помещении: роботами-автоматами, хранилищами, вентиляционными коробами, трубами для отвода тепла и т. д. (рис. 3.2). Как и в главе 2, для моделирования интенсивности появления блокаторов на линии прямой видимости между ПУ и БС сделано предположение о расположении блокаторов в \mathcal{R}^2 согласно точечному пуассоновскому процессу с параметром λ_B бл./м², тогда их число соответствует пуассоновскому распределению с параметром $\lambda_B L^2$. Блокаторы имеют цилиндрическую форму с радиусом основания r_B ; высота блокаторов h_B соответствует высоте блокирующего радиосигнал оборудования и достаточна для полного перекрытия прямой видимости между ПУ и БС, при этом, в отличие от модели главы 2, $h_U < h_A < h_B$.

Уточнение модели макромобильности

Классический подход к анализу макромобильности с подвижными блокаторами и статичным ПУ, исследованный в главе 2 при анализе двойного подключения [74], [108], в главе 3 расширен на случай подвижного ПУ, пользователя при неподвижных блокаторах [122]. Последний подход, помимо моделирования интенсивности появления блокаторов на линии прямой видимости между ПУ и БС, позволяет учитывать рассогласование лучей антенн ПУ и БС вследствие макро- и микромобильности, уточняя метод оценки длительности пребывания ПУ в состоянии прямой видимости с БС.

Модель макромобильности в главе 3, описывающая динамику изменения координат $(x(t), y(t))$ пользователя при перемещении в зоне покрытия БС, построена как комбинации независимых одномерных диффузионных процессов $X(t) \in (0, L)$ по оси $0x$ и $Y(t) \in (0, L)$ по оси $0y$ с коэффициентами диффузии D_x и D_y (L – длина и ширина рассматриваемой зоны покрытия БС).

Согласно [119], что для одномерного ограниченного диффузионного процесса плотность вероятности $p(x, t|x_0, t_0)$ нахождения броуновской частицы в точке x в момент времени t , учитывая, что она находилась в точке x_0 в момент времени t_0 , подчиняется второму закону диффузии Фика и описывается уравнением Фоккера-Планка в виде

$$\frac{\partial p(x, t|x_0, t_0)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p(x, t|x_0, t_0)}{\partial x^2}, \quad x, x_0 \in (0, L), \quad 0 \leq t_0 \leq t, \quad (3.1)$$

с начальным условием $p(x, t) = \delta(x - x_0)$ и однородными граничными условиями

$$\frac{\partial p(0, t)}{\partial t} = \frac{\partial p(L, t)}{\partial t} = 0, \quad t \geq t_0.$$

Решение задачи для каждой координаты x и y может быть получено методом разделения переменных, как описано в [4], [89], [109]:

$$p(x, t|x_0, t_0) = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{2} \right)^2 \frac{t - t_0}{\tau} \right] \cos \left(\frac{nx\pi}{L} \right), \quad (3.2)$$

где D – коэффициент диффузии, $\tau = L^2/D$ – время релаксации.

Для решения линейных неоднородных дифференциальных уравнений с заданными краевыми условиями используется функция Грина $\mu_1(x, t|x_0, t_0)$ – первый начальный момент решения (3.2), представляющая собой отклик системы на точечное воздействие (дельта-функцию Дирака).

$$\mu_1(t, x; L, t_0, x_0) = \frac{L}{2} - \frac{4L}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{2} \right)^2 \frac{t - t_0}{\tau} \right] \cos \left(\frac{(2n+1)x_0\pi}{L} \right)}{(2n+1)^2}. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) используется далее в главе 3 при расчете среднего изменения координаты ПУ в модели блокировки прямой видимости между ПУ и БС вследствие перемещения ПУ.

При расположении БС в начале координат $(0,0,0)$ с фазовым центром антенны БС в точке $(0,0, h_A)$ проведя ось $0x$ через ПУ, получим, что в момент $t_0 = 0$ после завершения поиска луча ПУ имеет начальные координаты

$(x_0, 0, 0)$ с фазовым центром антенны БС в $(x_0, 0, h_U)$ и идеальное выравнивание лучей антенн ПУ и БС. Угловые отклонения осей лучей антенны как на ПУ, так и на БС от линии, соединяющей фазовые центры, равны нулю: $\phi(t_0) = \theta(t_0) = 0$. Рассмотренный сценарий приведена на рис. 3.3. Координаты (x, y, h_U) фазового центра антенны ПУ, угол азимута $\beta_H(t)$ (рыскание, по горизонтали) и угол места $\beta_V(t)$ (тангаж, по вертикали) оси диаграммы направленности антенны ПУ соответствуют моменту времени $t, t > t_0$. Задачей является оценка расстояния $l_2(t)$ между фазовыми центрами антенн ПУ и БС и одинаковых для ПУ и БС угловых отклонений $\theta(t) = |\beta_H(t) - \beta_H(t_0)|$ по горизонтали и $\phi(t) = |\beta_V(t) - \beta_V(t_0)|$ по вертикали оси луча антенны от линии, соединяющей фазовые центры антенн ПУ и БС.

Пусть d_1 и l_1 – 2D- и 3D-расстояния между ПУ и БС в момент времени t_0 , а d_2 и l_2 – 2D- и 3D-расстояния между ПУ и БС в момент времени t , соответственно. Опираясь на схему рис. 3.3, сформулируем соответствующие леммы для вычисления этих параметров.

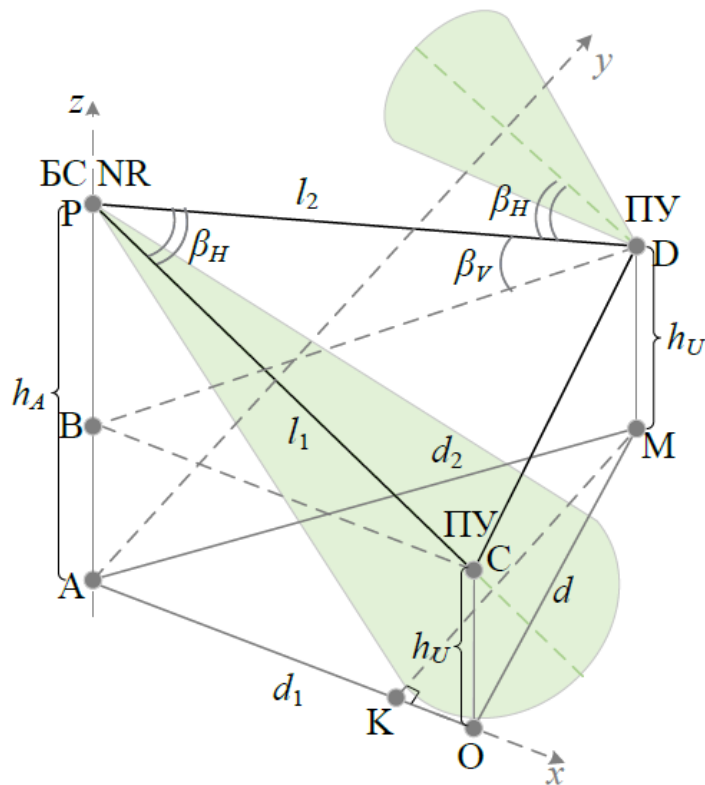


Рис. 3.3. Смещение луча антенны ПУ из-за макромобильности пользователя.

Лемма 3.1. Расстояние между фазовыми центрами антенн ПУ и БС спустя время t после момента t_0 завершения процедуры поиска луча (3D расстояние $l_2(t)$) при моделировании движения ПУ двумя независимыми диффузионными процессами $X(t)$ и $Y(t)$ по осям $0x$ и $0y$, заданными (3.1), определяется формулой

$$l_2(t) = \sqrt{[X(t)x_0]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}, \quad (3.4)$$

$$t > t_0, X(t_0) = x_0, Y(t_0) = 0.$$

Доказательство.

В соответствии с рис. 3.4 по теореме Пифагора

$$\text{из } \Delta AOM \quad d_2 = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}, \quad x, y \in [0, L];$$

$$\text{из } \Delta BDP \quad l_2 = \sqrt{d_2^2 + (h_A - h_U)^2}, \quad l_2 \in [0, \sqrt{2L^2 + (h_A - h_U)^2}], \quad d_2 \in [0, \sqrt{2}L], \quad h_U \leq h_A.$$

Лемма доказана.

Лемма 3.2. Угловые отклонения оси диаграммы направленности антенны ПУ $\theta(t)$ по горизонтали и $\phi(t)$ по вертикали спустя время t после момента t_0 завершения процедуры поиска луча при моделировании движения ПУ двумя независимыми диффузионными процессами $X(t)$ и $Y(t)$ по осям $0x$ и $0y$, заданными (3.1), определяются формулами

$$\theta(t) = \left| \arccos \left[\frac{X(t)x_0 + (h_A - h_U)^2}{\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)^2 + Y(t)^2 + (h_A - h_U)^2]}} \right] \right|, \quad (3.5)$$

$$\phi(t) = \left| \arccos \left[\frac{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}}{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] - \arccos \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right|, \quad (3.6)$$

$$t > t_0, \phi(t), \theta(t) \in [0, \pi].$$

Доказательство приведено в Приложении 4.

Лемма 3.1 и лемма 3.2 использованы далее при оценке динамики спектральной эффективности.

Уточнение модели микромобильности

Модель микроомобильности в главе 3, описывающая динамику изменения направленности оси луча антенны ПУ, также построена в виде комбинации независимых одномерных диффузионных процессов $Z_H(t) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ для угла азимута β_H в горизонтальной плоскости и $Z_V(t) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ для угла места β_V в вертикальной плоскости, заданных уравнением Фоккера-Планка вида (3.1):

$$\frac{\partial q(\gamma, t | \gamma_0, t_0)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 q(\gamma, t | \gamma_0, t_0)}{\partial \gamma^2}, \quad \gamma, \gamma_0 \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \quad 0 \leq t_0 \leq t, \quad (3.7)$$

с начальным условием $q(\gamma, t) = \delta(\gamma - \gamma_0)$ и однородными граничными условиями

$$\frac{\partial q\left(-\frac{\pi}{2}, t\right)}{\partial t} = \frac{\partial q\left(\frac{\pi}{2}, t\right)}{\partial t} = 0, \quad t \geq t_0.$$

Решение задачи (3.3) для каждого угла β_H и β_V имеет вид [4], [89], [109]:

$$q(\gamma, t | \gamma_0, t_0) = \frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{2}\right)^2 \frac{t - t_0}{\tau_\gamma}\right] \cos(2n\gamma), \quad (3.8)$$

где D_γ – коэффициент диффузии, $\tau_\gamma = \pi^2/4D_\gamma$ – время релаксации.

Таким образом, в численном эксперименте в разделе 3.3 при расчете угловых отклонений последовательно учитываются оба эффекта – макро- и микроомобильность, которые моделируются с помощью независимых одномерных диффузионных процессов.

Дополнение модели распространения радиосигнала

Напомним, что режим RRM-релаксации позволяет ПУ и БС пропускать циклы синхронизации DRX между измерениями RSRP/RSRQ. За это время макроомобильность изменяет расстояния и рассогласование лучи антенн ПУ и БС, а микроомобильность также влечет рассогласование лучей. Поэтому при оценке ОСШ (RSRP или SINR) спустя время t после поиска луча в формуле (1.4) следует учитывать и макро- и микроомобильность, т.е. использовать новое расстояние u между ПУ и БС и коэффициенты усиления $G_U(t)$ и $G_A(t)$, зависящие от угловых отклонений $\phi(t)$ и $\theta(t)$ оси диаграммы направленности антенны ПУ по вертикали и по горизонтали при $t > t_0$, $\phi, \theta \in [0, \pi]$.

В главе 3 рассмотрена модель диаграммы направленности антенны в виде эллиптического конуса. При построении модели предполагаются планарные (2D) симметричные антенные решетки как на ПУ и БС, с диаграммами направленности излучения антенн, соответствующими 3GPP TR 37.977 [54].

Для 2D антенной решетки на ПУ (на БС) коэффициент усиления антенны для углового отклонения θ угла азимута вычисляется как $G(\theta) = \varepsilon \rho(\theta)$, где параметр ε и функция направленности $\rho(\theta)$ зависят от 2D-ширины луча β антенны ПУ (от 2D-ширины луча α антенны БС), определяемой по формуле (1.1) для заданного числа антенных элементов N_U (N_A для БС), и имеют следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{2}{\cos^{\beta/2}}; \quad (3.9)$$

$$\rho(\theta) = \begin{cases} 1 - \theta/\beta, & \theta \leq \beta; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Далее от планарной 2D модели сделан переход к 3D модели диаграммы направленности в виде эллиптического конуса, в которой главный лепесток симметричен относительно главных осей эллипса. В этом случае коэффициент усиления для приемника и передатчика, может быть представлен в виде

$$G(\phi, \theta) = K \rho_V(\phi) \rho_H(\theta), \quad (3.11)$$

где K – коэффициент усиления при идеальном выравнивании лучей антенн ПУ и БС, $\rho_V(\phi)$ и $\rho_H(\theta)$ - функции направленности для угловых отклонений ϕ и θ оси луча антенны рассматриваемого устройства от прямой, соединяющей фазовые центры антенн приемо-передающих устройств в вертикальной и горизонтальной плоскостях, вычисляемые по (3.10), $\phi, \theta \in [0, \pi]$. Заметим, что угловые отклонения ϕ и θ одинаковы для ПУ и БС, а вид функций направленности $\rho_V(\phi)$ и $\rho_H(\theta)$ различается для ПУ и БС, поскольку зависит от конфигурации антенной решетки устройства. Выражение (3.11) используется при расчете SINR в формуле (1.4) вместо выражения (1.2).

Уточнение модели блокировки

Для оценки вероятности наличия/отсутствия прямой видимости между перемещающимся по модели макромобильности в виде комбинации двух независимых диффузионных процессов ПУ и неподвижной БС спустя время после выравнивания лучей антенн ПУ и БС использован подход [4], [73].

На рис. 3.4 согласно модели макромобильности (рис. 1.3) изображена «зона блокировки» прямой видимости в форме прямоугольника со сторонами $2r_B$ и $\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}$.

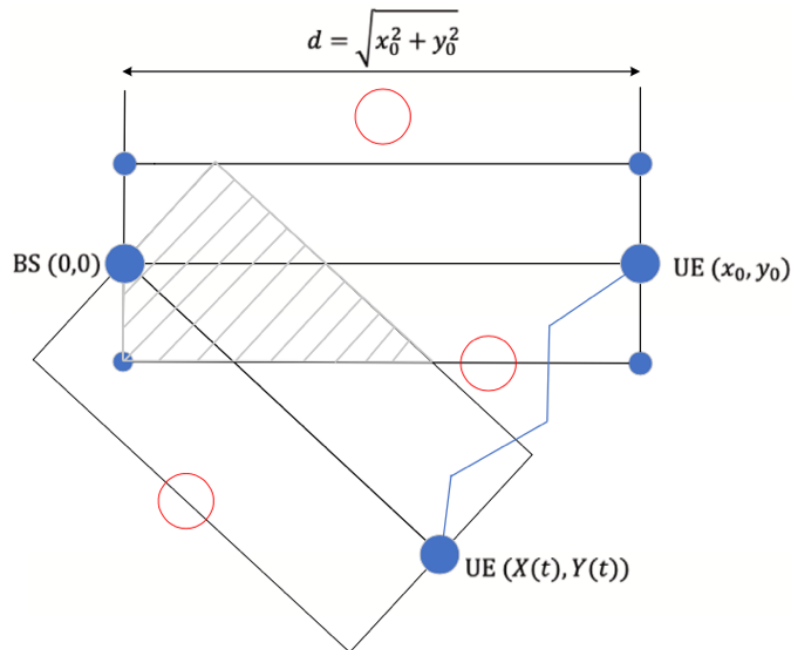


Рис. 3.4. Схема пересечения (заштрихованная область) зон блокировки прямой видимости между ПУ и БС для моментов времени t и $t_0 = 0$

Модель блокировки прямой видимости между ПУ и БС построена в виде Марковского процесса (МП) $B(t) \in \{0,1\}$ с двумя состояниями: 0 – отсутствие блокатора прямой видимости в зоне блокировки, 1 – присутствие блокатора прямой видимости в зоне блокировки (прямой видимости нет). Матрица переходных вероятностей МП $B(t)$ за время t имеет вид

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} p_{00}(t) & 1 - p_{00}(t) \\ p_{10}(t) & 1 - p_{10}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

где по формуле условной вероятности

$$p_{00}(t) = \frac{\Pr\{B(t) = 0, B(0) = 0\}}{\Pr\{B(0) = 0\}},$$

$$p_{10}(t) = \frac{\Pr\{B(t) = 0, B(0) = 1\}}{\Pr\{B(0) = 1\}}.$$
(3.13)

Для модели блокатора цилиндрической формы из раздела 3.1 в предположении о плотности λ_B [блокаторов/кв.м], радиусе r_B [м] и высоте h_B [м] блокатора, $h_B > h_A$, и координатах ПУ в момент времени $t_0 = 0$ компоненты вектора $(\Pr\{B(t_0 = 0) = 0\}, \Pr\{B(t_0 = 0) = 1\})$ начального распределения вероятностей состояний МП $B(t) \in \{0,1\}$ имеют вид

$$\Pr\{B(t_0 = 0) = 0\} = \exp[-2\lambda_B r_B x_0],$$

$$\Pr\{B(t_0 = 0) = 1\} = 1 - \exp[-2\lambda_B r_B x_0].$$
(3.14)

Для определения элементов матрицы переходных вероятностей $\mathbf{P}(t)$ использован подход [4] через площади геометрических фигур. На рис. 3.5 показан четырехугольник $ABCD$ — область пересечения зон блокировки прямой видимости для ПУ в моменты $t_0 = 0$ и t , при этом отклонение азимута вследствие макромобильности пользователя обозначено θ .

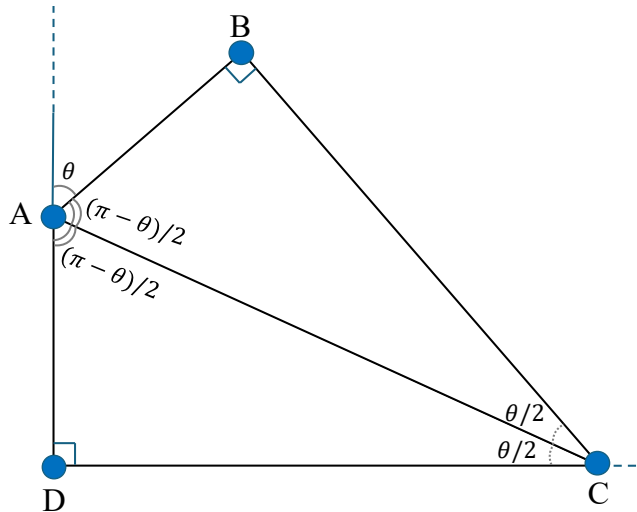


Рис. 3.5. Область пересечения двух зон блокировки прямой видимости между ПУ и БС для моментов времени t и $t_0 = 0$.

Лемма 3.3. Угловое отклонение θ вследствие макромобильности ПУ при моделировании движения ПУ двумя независимыми диффузионными процессами $X(t)$ и $Y(t)$ по осям Ox и Oy , заданными (3.1), имеет вид

$$\theta(t) = \arccos \frac{x_0^2 + [X(t)]^2 - [X(t) - x_0]^2}{2x_0 \sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}}. \quad (3.15)$$

Доказательство.

В ΔAOM на рис. 3.3

$$d_1 = x_0, d_2 = \sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}, d = \sqrt{[X(t) - x_0]^2 + [Y(t)]^2}$$

Подставив эти выражения в теорему косинусов для ΔAOM

$$\theta = \arccos \frac{d_1^2 + d_2^2 - d^2}{2d_1 d_2}, \quad (3.16)$$

получим (3.15).

Лемма доказана.

Лемма 3.4. Площадь S области пересечения двух прямоугольных зон блокировки прямой видимости между ПУ и БС в моменты времени $t_0 = 0$ и t вычисляется по формуле

$$S = r_B^2 \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}, \quad (3.17)$$

где r_B – радиус блокатора, θ – угловое отклонение по горизонтали (азимут) оси луча антенны ПУ от линии, соединяющей фазовые центры антенн ПУ и БС в момент времени $t_0 = 0$.

Доказательство.

В четырехугольнике $ABCD$ на рис. 3.5 $\angle B = \angle D = \pi / 2$, а $\|AB\| = \|AD\| = r_B$. Заметим, что $\Delta ABC = \Delta ADC$, $\angle BAD = \pi - \theta$, таким образом,

$$\angle BCD = 2\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} - (\pi - \theta), \quad (3.18)$$

из чего следует, что $\angle BCD = \theta$.

Поскольку что $\Delta ABC = \Delta ADC$, то $\angle ACB = \angle ACD = \theta / 2$. По определению котангенса $CB = CD = r_B \operatorname{ctg}(\theta/2)$.

По формуле площади прямоугольного треугольника

$$S_{\Delta ABC} = S_{\Delta ADC} = \frac{1}{2} r_B^2 \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}. \quad (3.19)$$

Таким образом, площадь S области пересечения

$$S = S_{\Delta ABC} + S_{\Delta ADC} = r_B^2 \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}, \quad \theta \in (0, \pi). \quad (3.17)$$

Лемма доказана.

Используя свойство отсутствия последействия точечного пуассоновского процесса, числитель $p_{00}(t)$ в (3.13) можно записать как

$$\begin{aligned} \Pr\{B(t) = 0, B(0) = 0\} = \exp[-\lambda_B(2r_B \cdot \\ \cdot \sqrt{(E[X(t)] - x_0)^2 + (E[Y(t)])^2} - S)] \exp[-2\lambda_B r_B x_0], \end{aligned} \quad (3.20)$$

где $E[X(t)]$ и $E[Y(t)]$ – средние значения координат x и y ПУ в момент времени t , определяемые функцией Грина (3.3).

Подставляя (3.14) и (3.20) в (3.13), получаем

$$p_{00}(t) = \exp[-2\lambda_B(r_B \sqrt{(E[X(t)] - x_0)^2 + (E[Y(t)])^2} - S + r_B x_0)]. \quad (3.21)$$

Событие $\{B(t) = 0 | B(0) = 1\}$ подразумевает, что блокатор, перекрывающий прямую видимость в момент времени $t_0 = 0$, находится вне области пересечения между зонами блокировки прямой видимости. Следовательно, в области пересечения нет блокаторов ни в момент времени $t_0 = 0$, ни в момент времени t . Тогда числитель $p_{10}(t)$ может быть записан как

$$\begin{aligned} \Pr\{B(t) = 0, B(0) = 1\} = 1 - \exp[-\lambda_B(2r_B x_0 - S)] \cdot \\ \cdot \exp[-\lambda_B S] \exp[-\lambda_B(2r_B \cdot \\ \cdot \sqrt{(E[X(t)] - x_0)^2 + (E[Y(t)])^2} - S)]. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Наконец, искомую вероятность можно записать как

$$\begin{aligned} p_{10}(t) = \frac{1 - \exp[-\lambda_B(2r_B x_0 - S)] \exp[-\lambda_B S]}{1 - \exp[-2\lambda_B r_B x_0]} \cdot \\ \cdot \exp[-\lambda_B(2r_B \sqrt{(E[X(t)] - x_0)^2 + (E[Y(t)])^2} - S)]. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Зная элементы $p_{00}(t)$ и $p_{10}(t)$ матрицы переходных вероятностей $\mathbf{P}(t)$ из (3.21) и (3.23) соответственно, а также начальное распределение (3.14), найдем

Видео	DL	AR	60	30, 45	Mean = DR/(8*Частота пакетов (PR)), STD = 10.5% от Mean, Min = 50% от Mean, Max = 150% от Mean	Mean = 0, STD = 2, [Min, Max] = [-4, 4]	10
		VR		30, 45			10
	UL	CG		8, 30			15
		AR		10			30

В качестве альтернативы X-VR исследовано приложение просмотра веб-страниц, смоделированное стандартизированной 3GPP FTP моделью 3, описанной в главе 1. Это источник пульсирующего трафика «включено/выключено», где длительности активной передачи T_O и паузы T_S имеют экспоненциальное распределение с параметрами λ_O и λ_S , а объем данных — 2 Мбайт.

Динамика спектральной эффективности

При оценке спектральной эффективности $S_E(t)$ следует учитывать макро- и микромобильность ПУ за время между соседними измерениями значений RSRP/RSRQ, т.е. при оценке SINR спустя время t после завершения процедуры поиска луча в формуле (1.4) следует использовать значения коэффициентов усиления антенн ПУ и БС, $G_U(t)$ и $G_A(t)$, рассчитанных по формулам (3.2)-(3.7)-(3.10).

Утверждение 3.1. Спектральная эффективность $S_E(t)$ ПУ, находящегося в момент t_0 завершения процедуры поиска луча в точке $(x_0, 0, h_U)$, принимающего сигнал от БС в точке $(0, 0, h_A)$, спустя время t при моделировании движения ПУ двумя независимыми диффузионными процессами $X(t)$ и $Y(t)$ по осям Ox и Oy , заданными формулой (3.1), может быть вычислено по следующей формуле:

$$S_E(t) = \log_2 \left[1 + \right. \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{P_T \cdot \varepsilon_A \cdot \varepsilon_U \cdot 10^{2 \log_{10} f_O + 3.24} (\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2})^{-2.1}}{N_0 + I_M} \cdot \\
 & \cdot \rho_{A,V} \left(\left| \arccos \left[\frac{X(t)x_0 + (h_A - h_U)^2}{\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right| \right) \\
 & \cdot \rho_{A,H} \left(\left| \arccos \left[\frac{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}}{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \arccos \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right| \right) \cdot \\
 & \cdot \rho_{U,V} \left(\left| \arccos \left[\frac{X(t)x_0 + (h_A - h_U)^2}{\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right| \right) \\
 & \cdot \rho_{U,H} \left(\left| \arccos \left[\frac{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}}{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \arccos \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right| \right),
 \end{aligned}$$

где параметры ε_A , ε_U вычисляются по формулам (3.9), а значения функций направленности $\rho_{A,V}$, $\rho_{U,V}$ для углового отклонения ϕ по вертикали и $\rho_{A,H}$, $\rho_{U,H}$ для углового отклонения θ по горизонтали вычисляются по формулам (3.10) в зависимости от числа антенных элементов.

Доказательство.

По определению спектральной эффективности $S_E(t) = \log_2(1 + S(t))$. Здесь ОСШ по формуле (1.4) зависит от времени следующим образом:

$$S(t) = \frac{P_T G_A(t) G_U(t) L(y, t)}{N_0 + I_M}, \quad (3.26)$$

где $S(t)$ ОСШ на приемнике в момент времени t , P_T – мощность передатчика, коэффициенты $G_A(t)$ и $G_U(t)$ усиления антенн ПУ и БС определяются по формуле (3.11) для угловых отклонений оси диаграммы направленности антенны ПУ, определяемых леммой 3.2, $L(y, t)$ – коэффициент потери

мощности принимаемого ПУ сигнала на 3D расстоянии y от БС в момент t ,
 N_0 – шум, I_M – интерференция, при этом

$G_A(t) = \varepsilon_A \rho_{A,H}(\phi) \rho_{A,V}(\theta)$ по формуле (3.11);

$G_U(t) = \varepsilon_U \rho_{U,H}(\phi) \rho_{U,V}(\theta)$ по формуле (3.11);

$L(y, t) = A \cdot y(t)^{-\zeta}$ – формула потери мощности из-за затухания в линейном масштабе, где $A = 10^{2 \log_{10} f_c + 3,24}$ получен переводом в линейную шкалу $L_{dB}(y)$ в децибелах в формуле (1.3);

$y(t) = l_2 = \sqrt{[X(t) - x_0]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}$ – по теореме Пифагора из ΔPBD на рис. 3.4;

шум N_0 задан, интерференция I_M зависит от плотности λ_A размещения БС и может быть определена с помощью моделей, предложенных в [85], [109].

Утверждение доказано.

3.2 Модель состояний пользовательского устройства для анализа механизмов энергосбережения

Цепь Маркова

Построенная ниже модель состояний ПУ с учетом механизмов энергосбережения построена с использованием подхода декомпозиции-агрегации главы 2. ЦМ имеет двухуровневую структуру, где каждый уровень описывается собственной поглощающей ЦМ, как показано на рис. 3.6 (Табл. О.3 в Списке обозначений). Уровень II построен на основе базовой модели механизма DRX для RRC-соединения из главы 1, который расширен возможностью применения на ПУ двух современных механизмов энергосбережения – механизма релаксации управления радиоресурсами (Radio Resource Management Relaxation, RRM-relaxation) и механизма сигнала пробуждения (Wake-Up Signal, WUS). Как и в базовой модели DRX для RRC-соединения в главе 1 поглощающая ЦМ моделирует интервал времени от момента окончания выравнивания лучей ПУ и БС до момента разрыва RRC-

соединения с опорной БС при блокировке прямой видимости между ПУ и БС либо до окончания активной передачи пользовательских данных от БС к ПУ.

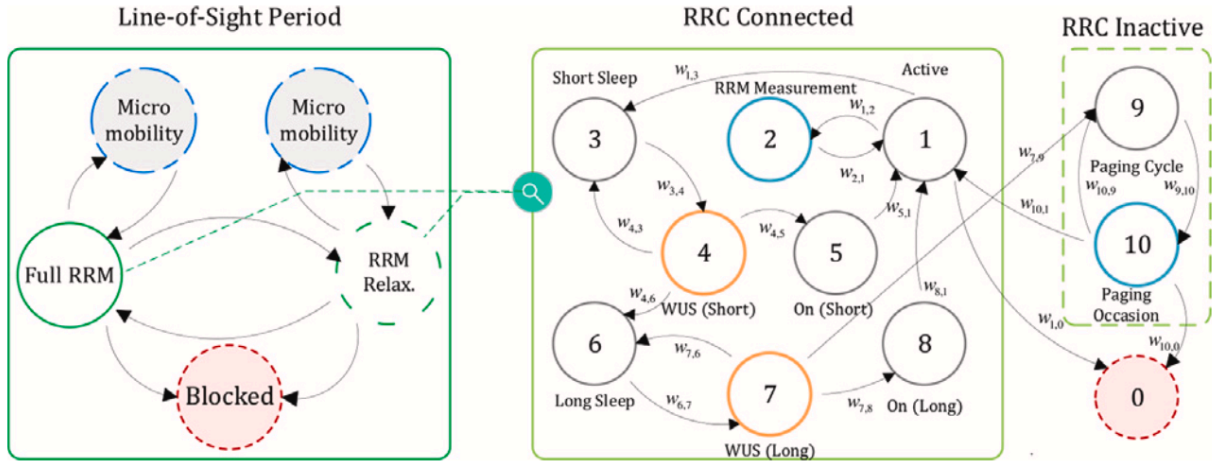


Рис. 3.6. Модель состояния ПУ в RRC-соединении с одной БС с учетом 3-х механизмов энергосбережения в виде двух уровней цепей Маркова:

$$\begin{aligned} \text{уровень I} &- \{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{RRM} \text{ (RRM-релаксация),} \\ \text{уровень II} &- \{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM} \text{ (DRX, WUS)} \end{aligned}$$

На первом уровне для оценки времени, которое ПУ проводит в каждом из двух режимов механизма RRM (без использования / с использованием RRM-релаксации) построена поглощающая ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{RRM}$. Пространство состояний $\mathbb{Z}^{RRM} = \{\text{Full RRM, RRM – rel., Full RRM – Micromobility, RRM – rel. – Micromobility, Blocked}\}$ цепи Маркова $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\}$ на уровне I модели включает состояния «Full RRM» с регулярным измерением RSRP/RSRQ и «RRM-rel.» с пропусками изменения RSRP/RSRQ, а также два состояния «Micromobility», в которые ПУ попадает при рассогласовании лучей ПУ и БС. Поглощающее состояние «Blocked» отвечает за завершение интервала прямой видимости из-за наступления макромобильности. Вероятности переходов u_{ij}^{RRM} образуют матрицу $\mathbf{U}^{RRM} = [u_{ij}^{RRM}], i, j \in \mathbb{Z}^{RRM}$ переходных вероятностей ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\}$, элементы которой зависят от распределений длительностей интервалов до событий макромобильности, микромобильности и измерения RSRP/RSRQ и

определены в Приложении 3. Компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}_{L1}^{RRM} = (\pi_{L1,i}^{RRM})_{i \in \mathbb{Z}^{RRM}}$ начального распределения ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\}$ могут быть записаны как

$$\pi_{L1,i}^{RRM} = \begin{cases} 1, & i = \text{Full RRM}; \\ 0, & i \in \mathbb{Z}^{RRM} \setminus \{\text{Full RRM}\}. \end{cases} \quad (3.27)$$

Среднее число $n_{L1,j}^{RRM}$ попадания ПУ в состояние $j \in \mathbb{Z}^{RRM} \setminus \{\text{Blocked}\}$ за время до события макромобильности можно вычислить, используя формулу (1.33) при $\mathbb{A} = \mathbb{Z}^{RRM} \setminus \{\text{Blocked}\}$:

$$n_{L1,j}^{RRM} = \sum_{i \in \mathbb{Z}^{RRM} \setminus \{\text{Blocked}\}} \pi_{L1,i}^{RRM} d_{L1,ij}^{RRM}, \quad j \in \mathbb{Z}^{RRM} \setminus \{\text{Blocked}\}, \quad (3.28)$$

где $d_{L1,ij}^{RRM}$ – элементы фундаментальной матрицы $\mathbf{D}_{L1}^{RRM} = (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{RRM})^{-1}$ ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\}$, а \mathbf{I} — единичная матрица.

На *втором уровне* для моделирования механизмов DRX и WUS, которые включаются как в режиме с регулярным измерением RSRP/RSRQ (состояние «Full RRM» ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\}$ I уровня), так и в режиме с пропуском измерения RSRP/RSRQ (состояние «RRM-rel.» ЦМ $\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\}$ I уровня), построена поглощающая ЦМ $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM} = \{0, 1, \dots, 10\}$ II уровня. Состояние 1 (Active) соответствует приему сигнальной информации по PDCCH и пользовательских данных по PDSCH. Состояние 2 (RRM Measurement) соответствует регулярному измерению RSRP/RSRQ, с периодичностью, заданной таймером t_M (SSB-based RRM Measurement Timing Configuration window, SMTC window), получаемым ПУ в блоке сигнала синхронизации SSB. В соответствии с [44] в режиме «RRM-rel.» выполняется и передается на БС только каждое K -е измерение, т.о. таймер t_M увеличивается в K раз по сравнению с режимом регулярного измерения RSRP/RSRQ.

Если по истечении таймера бездействия t_I в состоянии приема данных ПУ не обнаруживает DCI, запускается первый короткий сон (Short Sleep, состояние 3). После короткого сна ПУ пробуждается для мониторинга DCI в процедуре «On Duration» (состояние 5). При использовании WUS «On Duration» запускается только после его проверки (состояние 4). При обнаружении WUS ПУ переходит в состояние приема данных (состояние 1),

иначе возвращается в короткий сон (состояние 3). После N_{SS} циклов короткого сна без WUS ПУ переходит в длинный сон (Long Sleep, состояние 6). Циклы длинного сна аналогично включают проверку WUS (состояние 7) и «On Duration» (состояние 8). После N_{LS} циклов длинного сна без WUS ПУ переходит в RRC-Inactive: ожидание пейджинга «РС» (состояние 9) и его выполнение «РС Occasion» (состояние 10). При обнаружении данных на БС во время пейджинга ПУ переходит в состояние передачи данных (состояние 1). В поглощающее состояние 0 (окончание передачи) ЦМ переходит только из состояний 1, 4, 8 и 10.

В предположении о начале режима RRM с состояния приема передачи данных для ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$, моделирующей состояние ПУ с точки зрения механизма DRX, компоненты вектора $\boldsymbol{\pi}_{L2}^{RRM} = (\pi_{L2,i}^{RRM})_{i \in \mathbb{Y}^{RRM}}$ начального распределения ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\}$ могут быть записаны как

$$\pi_{L2,i}^{RRM} = \begin{cases} 1, & i = 1; \\ 0, & i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{1\}. \end{cases} \quad (3.29)$$

Предположим, что случайная длительность интервала до попадания ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM} = \{0, 1, \dots, 10\}$ в поглощающее состояние 0 имеет экспоненциальное распределение с параметром λ_0 (активная передача пользовательских данных), а интервал до восстановления связи с БС - экспоненциальное распределение с параметром λ_5 (пауза передачи данных).

По аналогии с формулами (1.36) и (2.13) в предположении об экспоненциальном с параметром T_{RRM}^{-1} распределении длительности случайного интервала работы ПУ в текущем режиме механизма RRM, плотность $f_C(t)$ распределения случайной длительности RRC-соединения может быть найдена как минимальная из длительностей интервалов до соответствующих случайных событий:

$$f_C^{RRM}(t) = \sum_{\substack{\forall m,j,l \in \{T_L; \bar{T}_A; T_{RRM}\}, \\ m \neq j \neq l}} f_m(t) [1 - F_j(t)][1 - F_l(t)], \quad (3.30)$$

где $f_{T_L}^{RRM}(t)$ и $F_{T_L}^{RRM}(t)$ – плотность и функция распределения длительности интервала до события блокировки прямой видимости с БС по формуле (3.24), $f_{\tilde{T}_A}(t)$ и $F_{\tilde{T}_A}(t)$ – плотность и функция экспоненциального распределения длительности интервала до события микромобильности (1.8) с параметром (1.13), $f_{T_{RRM}}(t)$ и $F_{T_{RRM}}(t)$ – до смены режима механизма RRM, зависящих от таймера процедуры «RRM Measurement» в соответствующем режиме и таймера процедуры пейджинга.

Вероятности w_{ij}^{RRM} переходов поглощающей ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$ получены с применением подхода главы 1. Переход из состояния 1 в состояние 2 (рис. 3.3) выполняется при следующих условиях: в течение интервала t_M между соседними измерениями RSRP/RSRQ не должен завершиться интервал активной передачи пользовательских данных и связь с БС не должна быть потеряна, что приводит к следующему результату:

$$w_{12}^{RRM} = \int_{t_M}^{\infty} f_O(x) dx \int_{t_M}^{\infty} f_C^{RRM}(y) dy, \quad (3.31)$$

где $f_O(t)$ - плотность распределения длительности интервала активной передачи пользовательских данных, $f_C^{RRM}(y)$ имеет вид (3.30).

Далее по аналогии с главой 1 можно вычислить остальные переходные вероятности, являющиеся элементами подматрицы $\mathbf{W}^{RRM} = [w_{ij}^{RRM}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}}$, $\mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\} = \{1, \dots, 10\}$, как показано в Приложении 3. Матрица \mathbf{W}^{RRM} позволяет найти элементы d_{ij}^{RRM} фундаментальной матрицы $\mathbf{D}^{RRM} = (\mathbf{I} - \mathbf{W}^{RRM})^{-1}$. Тогда из (1.33) среднее число посещений ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$ состояния j определяется аналогично (2.3) и (2.9):

$$n_{L2,j}^{RRM} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}} \pi_{L2,i}^{RRM} d_{L2,ij}^{RRM}, \quad j \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}, \quad (3.32)$$

где $\pi_{L2,i}^{RRM}$ – компоненты вектора начального распределения ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\}$ по формуле (3.29).

Результаты утверждений раздела 3.2 использованы при численном анализе характеристик спектральной эффективности, энергоэффективности, энергопотребления и времени работы батареи в следующем разделе 3.3 диссертационной работы.

3.3 Численный анализ характеристик механизмов энергосбережения

Оценим эффективность рассматриваемых методов энергосбережения для различных сред распространения радиосигнала и приложений. Параметры системы по умолчанию приведены в таблице 3.2. Расчет времени работы батареи проведен для батареи смартфона емкостью 2000 мАч с напряжением 3,8 В и относительной долей энергопотребления для работы в сети 25% [115].

Таблица 3.2. Параметры системы [87], [126], [187]

Обозначение	Описание	Значение
λ_B	Плотность блокаторов, м^{-1}	0.1
r_B	Радиус блокатора, м	1.7
h_U, h_A	Высота ПУ/БС, м	1.5, 4
P_T	Излучаемая мощность передающей антенны, Вт	2
ζ	Коэффициент затухания сигнала в состоянии прямой видимости	2.1
I_M	Интерференция, дБи	3
δ	Время переключения антенной решетки, мкс	10
N_U, N_A	Число антенных элементов на ПУ/БС	15x15, 4x4
f_c	Рабочая частота, ГГц	28
λ_{OFF-VR}	Частота кадров AR/X-VR, кадров/с (fps)	60
$\lambda_{OFF-Web}$	Интенсивность поступления пакетов веб-трафика	0.5
$t_{ON-VR/Web}$	Среднее время передачи пакета, мс	10, 100
D_x, D_y	Коэффициенты диффузии по осям 0x, 0y	100
L	Длина стороны квадратной зоны, м	50
N_0	Шум, дБм	-84

$\Delta x, \Delta y$	Средняя скорость изменения координаты при перемещении ПУ	3, 3
$\Delta \theta, \Delta \phi$	Средняя скорость отклонения оси ПУ в горизонтальной и вертикальной плоскостях	10, 10
t_I, t_{ON}	Таймер бездействия/ Длительность процедуры «On Duration»	4, 2
t_{SS}, t_{LS}	Таймер короткого/длинного сна, мс	8, 32
T_{DRX}	Длина цикла DRX, мс	320
n_{SS}, n_{LS}	Число циклов короткого/длинного сна	3, 2
T_{BFI}	Пороговое значение числа индикаций неисправности луча	2
B_C	Емкость аккумулятора, мАч	2000
B_V	Напряжение аккумулятора, мВт	40
P_U	Единица мощности, мВт	40

Энергоэффективность на стороне ПУ оценивается в предположении о максимально возможной спектральной эффективности радиоканала между ПУ и БС в течение RRC- соединения. Построенная в разделе 3.2 поглощающая цепь Маркова уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \Upsilon^{RRM}$ позволяет оценить среднее число $n_{L2,j}^{RRM}$ посещений каждого из состояний цепи $i \in \Upsilon^{RRM} \setminus \{1, 2, \dots, 10\}$ по формуле (3.32) [62].

Таблица 3.3. Потребляемая мощность ПУ [87], [126], [128]

Обозначение	Процедура	Значение, ед./слот
e_1	Передача данных «Active»	350
e_2	Обнаружение SSB «RRM Measurement»	100
e_3	Короткий сон «Short Sleep»	45
e_4, e_7	Обнаружение «WUS Short», «WUS Long»	30
e_5, e_8	Обнаружение DCI «On Short», «On Long»	61
e_6	Длинный сон «Long Sleep»	20
e_9	Ожидание пейджинга «PC»	20
e_{10}	Пейджинг «PC Occasion»	61

Утверждение 3.2. Показатели энергоэффективности ПУ при применении механизма релаксации управления радиоресурсами и механизмов энергосбережения DRX и WUS могут быть оценены следующим образом.

Средняя спектральная эффективность радиоканала между ПУ и БС может быть оценена с использованием теоремы Шеннона-Хартли [127]:

$$E[S_E^{RRM}] = \int_0^{\infty} \log_2(1 + S_E(t)) f_C^{RRM}(t) dt, \quad (3.33)$$

где $S_E(t)$ — спектральная эффективность в момент времени t по формуле (3.25), $f_C^{RRM}(t)$ — плотность распределения длительности RRC-соединения по формуле (3.30).

Энергопотребление ПУ в течение RRC-соединения имеет вид

$$P_C^{RRM} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}} n_{L2,i}^{RRM} e_i, \quad (3.34)$$

где $n_{L2,i}^{RRM}$ — среднее число посещений ЦМ уровня $\Pi \{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$ по формуле (3.32).

Средняя энергоэффективность ПУ в течение RRC-соединения имеет вид

$$E[P_E^{RRM}] = \frac{W \cdot E[S_E^{RRM}]}{P_C^{RRM}}, \quad (3.35)$$

где W — ширины полосы частот [Гц].

Среднее время работы батареи ПУ:

$$E[B_T^{RRM}] = \frac{B_C[A \cdot \text{ч}] B_V[B]}{P_C^{RRM}[B\text{T}]}. \quad (3.36)$$

В (3.36) энергопотребление P_C^{RRM} измеряется в ваттах, так что следует учитывать преобразование джоулей в ватты.

Доказательство. Зная энергопотребление e_i в состоянии i (см. Таблицу 3.3), можно найти энергопотребление в течение RRC-соединения

$$P_C^{RRM} = \sum_{i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}} n_{L2,i}^{RRM} e_i, \quad (3.34)$$

откуда по формуле (1.22) среднее энергопотребление имеет вид

$$E[P_C^{RRM}] = \frac{1}{t_C^{RRM}} \sum_{i \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}} n_{L2,i}^{RRM} e_i, \quad (3.37)$$

при этом средняя длительность RRC-соединения имеет вид

$$t_C^{RRM} = \int_0^{+\infty} t f_C^{RRM}(t) dt, \quad (3.38)$$

где $f_C^{RRM}(t)$ – плотность распределения длительности RRC-соединения по формуле (3.30).

По формуле (1.23) энергоэффективность ПУ имеет вид

$$P_E^{RRM} = \frac{A_B [\text{Гц}] \cdot E[S_E^{RRM}] \cdot t_C^{RRM} [\text{бит}]}{E[P_C^{RRM}] [\text{Джоуль}]}. \quad (3.39)$$

По формуле (1.24) среднее время работы батареи ПУ имеет вид

$$E[B_T^{RRM}] = \frac{B_C [A \cdot \text{ч}] B_V [B]}{P_C^{RRM} [B\text{Т}]}. \quad (3.36)$$

Утверждение доказано.

Для оценки точности схемы анализа производительности системы, предполагающей цепочку вероятностных рассуждений с рядом упрощающих предположений, разработана имитационная модель в среде Matlab (Приложение 5), показавшая, что максимальная относительная погрешность при математическом моделировании не превышает 4%, поэтому дальнейший анализ выполнен по математической модели (3.33) - (3.37).

Учет поведения пользователя, зависящего от времени, крайне важен для анализа механизма энергосбережения RRM Relaxation, так как это позволяет пропускать процедуру синхронизации ПУ и БС. Для этого на Рис. 3.6 мы построили график зависимости спектральной эффективности от времени при плотности блокаторов $\lambda_B = 0,1$ ед./м², скорости микромобильности $\Delta\theta = \Delta\phi = 10$ °/с для начального местоположении ПУ $x_0 = 20$ м.

На рис. 3.7 разрыв спектральной эффективности между идеально согласованными и рассогласованными антенными решетками невелик из-за логарифмического характера функции Шеннона, слабо возрастающей при больших аргументах. Решетки с большим числом элементов и более

направленными диаграммами характеризуются более быстрым снижением спектральной эффективности и заметными колебаниями. Также наблюдаются плавное снижение из-за макромобильности и кратковременные отклонения от тренда, вызванные микрообильностью.

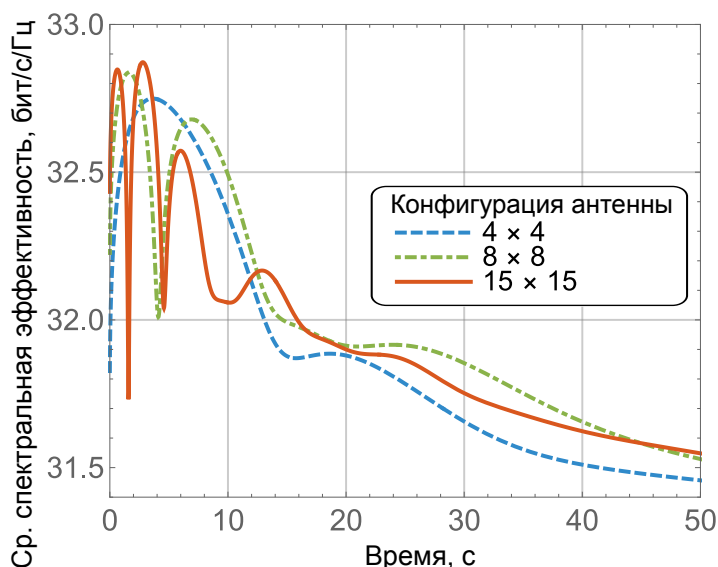


Рис. 3.7. Спектральная эффективность в зависимости от времени для различных антенных решеток

На рис. 3.8 показаны энергоэффективность и время работы батареи механизмов энергосбережения для приложений X-VR и веб-серфинга в зависимости от скорости рыскания и тангажа, характеризующих микрообильность. Параметры: $\lambda_B = 0,1$ ед./м², антенная решетка ПУ 4×4 , $x_0 = 20$ м. Как и ожидалось, высокая скорость микрообильности снижает энергоэффективность — потери достигают 30% из-за рассогласования лучей и последующих энергозатратных процедур управления лучом.

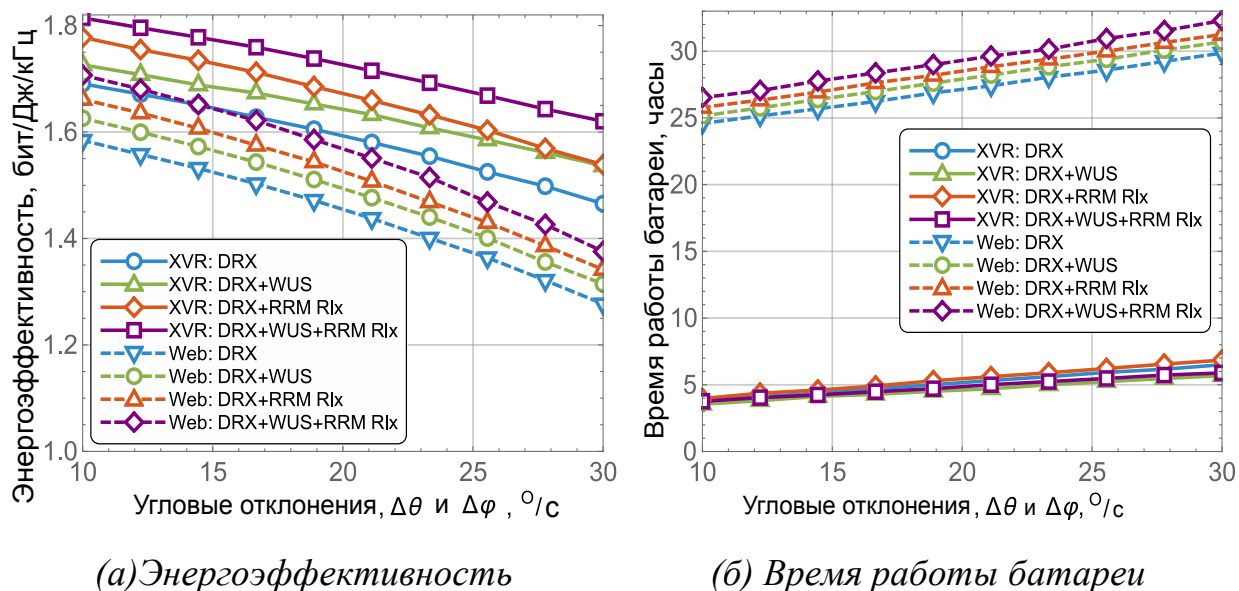
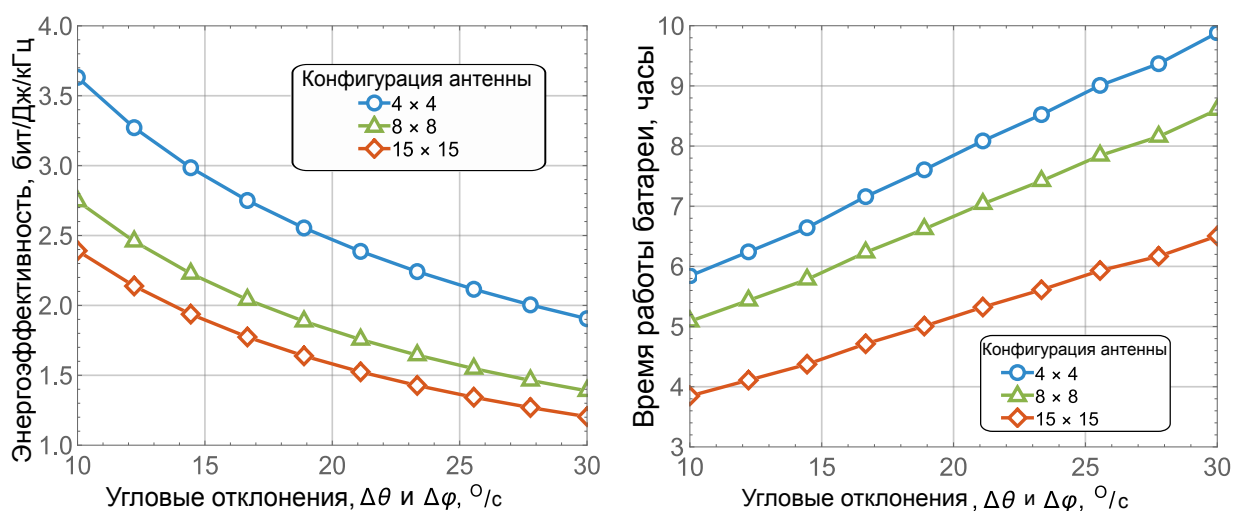


Рис.3.8. Энергоэффективность и время работы батареи в зависимости от микромобильности для разных схем энергосбережения

Можно заметить, что тип трафика существенно влияет на рассматриваемые метрики. Энергоэффективность веб-серфинг при использовании схемы «DRX+WUS+RRM Relaxation» оказывается хуже, чем простейшей схемы «DRX» для X-VR, так как метрика учитывает не только время сна, но и объем переданных битов. Таким образом, даже с учетом длительных периодов сна, приложения X-VR демонстрируют более высокую энергоэффективность за счет высокой скорости передачи данных для этого типа трафика, препятствующей переходу ПУ в режим сна. Механизм «WUS» улучшает показатели для обоих типов трафика, однако схема «DRX+RRM Relaxation» эффективнее, особенно в условиях низкой микромобильности. Наилучшая производительность наблюдается при совместном использовании всех механизмов в схеме «DRX+WUS+RRM Relaxation». 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. 3.8 (б), согласуются с тенденцией, наблюдаемой для энергоэффективности. Однако разрыв между показателями времени работы ПУ является значительным и увеличивается с ростом скорости микромобильности. Объяснение

заключается в том, что процедуры управления лучом менее энергозатратны, чем передача пользовательских данных (Табл. 3.3): с увеличением скорости микромобильности энергоэффективность ПУ снижается, но экономится заряд батареи. Разница во времени работы батареи для рассмотренных приложений также связана с наблюдаемым явлением: из-за интенсивной передачи данных X-VR расходует заряд батареи гораздо быстрее. Для веб-серфинга разница заметна при использовании схемы «DRX+WUS+RRM Relaxation», которая обеспечивает выигрыш в 5–10% по сравнению с простейшей схемой «DRX».



(а) Энергоэффективность

(б) Время работы батареи

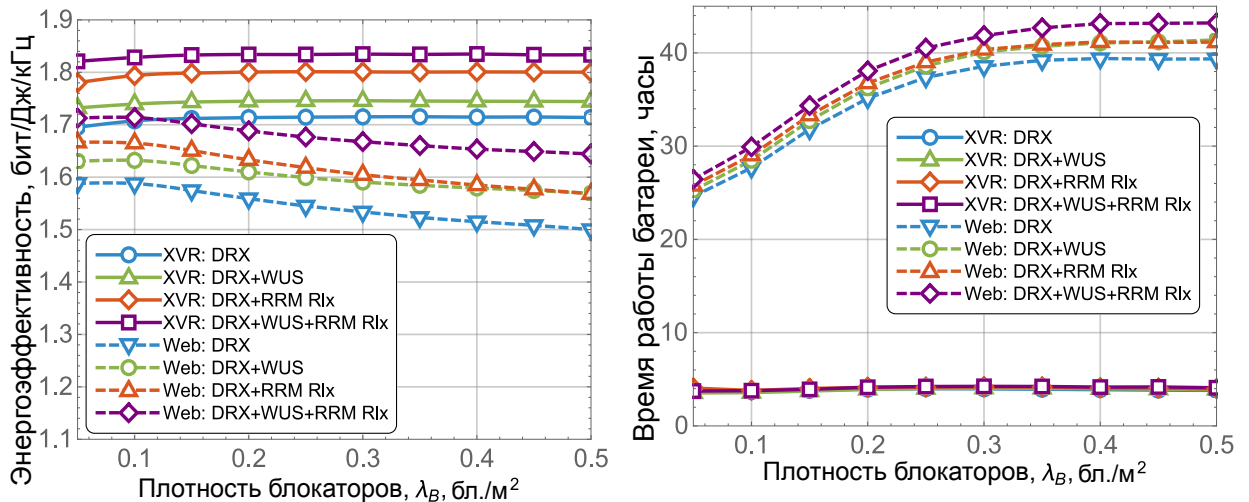
Рис. 3.9. Энергоэффективность и время работы батареи в зависимости от Микромобильности для различных антенных решеток

На Рис. 3.9 представлена зависимость энергоэффективности и времени работы батареи от микромобильности для различных антенных решеток при плотности блокаторов $\lambda_B = 0,1$ ед./м² и начального положения ПУ $x_0 = 20$ м.

На рис. 3.9 (а) показано негативное влияние усложнения диаграммы направленности антенны на энергоэффективность при микро- и макромобильности ПУ из-за снижения коэффициента усиления антенны и спектральной эффективности при RRM-релаксации. Для антенн с большим числом элементов (с более высокой направленностью) влияние этих

негативных факторов проявляется заметнее. Наилучшие результаты показывает решетка 4×4 , при этом для всего рассматриваемого диапазона скоростей рыскания и тангажа энергоэффективность антенной решетки 15×15 снизилась примерно на 1,5 бит/Дж/кГц. Время работы от батареи, показанное на Рис. 3.9(б), демонстрирует тенденции, аналогичные представленным на Рис. 3.8(б).

На Рис. 3.10 показано влияние блокаторов на энергоэффективность и время работы батареи для приложений X-VR и веб-серфинг при скорости микроподвижности $\Delta\theta = \Delta\phi = 10^\circ/\text{с}$, для антенных решеток БС 15×15 и ПУ 4×4 и начального положения ПУ $x_0 = 20 \text{ м}$.



(а) Энергоэффективность

(б) Время работы батареи

Рис. 3.10. Энергоэффективность и время работы батареи в зависимости от плотности блокаторов для приложений X-VR и веб-серфинг

Анализируя результаты по энергоэффективности, мы наблюдаем, что влияние блокаторов отличается для разных приложений. В частности, с увеличением плотности блокаторов ПУ начинает проводить значительное время в условиях отсутствия связи с почти нулевым энергопотреблением, за исключением периодических процедур управления лучом. Это поведение в основном затрагивает приложение веб-серфинг, поскольку потеря пакетов в этом состоянии увеличивает время пребывания в состоянии простоя. Данный

эффект отсутствует для приложения X-VR, которое характеризуется значительно меньшими интервалами между поступлениями пакетов. Использование наиболее сложной схемы энергосбережения «DRX+WUS+RRM Relaxation» максимизирует энергоэффективность для обоих приложений.

Аналогичные эффекты обнаружены для времени работы батареи, как показано на Рис. 3.10 (б). В данном случае увеличение времени работы обусловлено исключительно большей долей времени, которое ПУ проводит в условиях простоя. Примечательно, что это в основном связано с работой механизма DRX, поскольку другие схемы вносят незначительный вклад в дополнительное время работы. Для требовательного к скорости трафика приложения X-VR заметного выигрыша не наблюдается, поскольку ни одна из схем не способна экономить энергию при коротком интервале между поступлениями пакетов.

Таким образом можно сделать вывод, что для требовательных к скорости передачи данных приложений реального времени, таких как X-VR, для эффективной работы достаточно механизма DRX. Для приложений веб-серфинга с низкой скоростью передачи данных рекомендуется комбинация DRX, WUS и RRM Relaxation, даже при наличии умеренной микромобильности и макромобильности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 прерывистого приема 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 цепи Маркова для анализа показателей энергоэффективности ПУ – 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 цепи Маркова для оценки показателей энергоэффективности ПУ с урезанной функциональностью при комбинировании механизмов энергосбережения «прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами».

Автор выражает глубокую признательность заведующему кафедрой ТВиК РУДН, д.т.н., профессору Самуйлову К.Е. и д.т.н. Молчанову Д.А. — именно они открыли для меня область исследований энергоэффективности в беспроводных сетях 5G, а также к.ф.-м.н., доценту кафедры ТВиК РУДН Бесчастному В.А. за поддержку идей и конструктивные советы в научных изысканиях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

AR	–	<i>Augmented Reality</i> Дополненная реальность
ATIS	–	<i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i> Альянс разработчиков технических и операционных стандартов для ИКТ-отрасли
BFI	–	<i>Beamforming Feedback Indicator</i> Индикатор обратной связи по формированию луча
BS	–	<i>Base Station</i> Базовая станция (БС)
CBRA	–	<i>Contention-Based Random Access</i> Процедура случайного доступа с разрешением конфликтов
CFRA	–	<i>Contention-Free Random Access</i> Процедура случайного доступа без конфликтов
DCI	–	<i>Downlink Control Indicator</i> Индикатор управления нисходящего канала
DRX	–	<i>Discontinuous Reception</i> Прерывистый приём (механизм энергосбережения)
E-UTRA	–	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i> Эволюционированный универсальный наземный радиодоступ
ETSI	–	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций
FR1	–	<i>Frequency Range 1</i> Диапазон частот 1 (до 7,125 ГГц)
FR2	–	<i>Frequency Range 2</i> Диапазон частот 2 (миллиметровый диапазон, выше 24 ГГц)
HPBW	–	<i>Half-Power Beamwidth</i> Ширина луча по уровню половинной мощности
IMT	–	<i>International Mobile Telecommunications</i> Международная подвижная связь (стандарты ITU)

inter-RAT	–	<i>Inter-Radio Access Technology</i> Межсетевая технология радиодоступа (между разными RAT)
intra-RAT	–	<i>Intra-Radio Access Technology</i> Внутрисетевая технология радиодоступа (в пределах одной RAT)
ITU	–	<i>International Telecommunication Union</i> Международный союз электросвязи
LoS	–	<i>Line-of-Sight</i> Прямая видимость
LTE	–	<i>Long Term Evolution</i> Долгосрочное развитие сетей связи (стандарт 4G)
MAC	–	<i>Medium Access Control</i> Управление доступом к среде
mmWave	–	<i>Millimeter Wave</i> Миллиметровый диапазон волн
MN	–	<i>Main Node</i> Основной узел (опорная базовая станция в двойном подключении)
NLoS	–	<i>Non-Line-of-Sight</i> Отсутствие прямой видимости
NR	–	<i>New Radio</i> Новое радио (стандарт 5G)
PDCCCH	–	<i>Physical Downlink Control Channel</i> Физический нисходящий канал управления
PDSCH	–	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> Физический нисходящий общий канал (передача пользовательских данных)
PPP	–	<i>Poisson Point Process</i> Точечный пуассоновский процесс
QoS	–	<i>Quality of Service</i> Качество обслуживания

RACH	–	<i>Random Access Channel</i> Канал случайного доступа
RAN	–	<i>Radio Access Network</i> Сеть радиодоступа
RAT	–	<i>Radio Access Technology</i> Технология радиодоступа
RDM	–	<i>Random Direction Mobility</i> Модель случайного направления движения
RedCap	–	<i>Reduced Capability</i> Устройства с урезанной функциональностью (NR-Light)
RRC	–	<i>Radio Resource Control</i> Управление радиоресурсами (протокол)
RRM	–	<i>Radio Resource Management</i> Управление радиоресурсами
RSRP	–	<i>Received Signal Reference Power</i> Мощность принятого опорного сигнала
RSRQ	–	<i>Received Signal Reference Quality</i> Качество принятого опорного сигнала
SINR	–	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> Отношение сигнал-шум
SN	–	<i>Secondary Node</i> Вторичный узел (резервная базовая станция в двойном подключении)
SSB	–	<i>Synchronization Signal Block</i> Блок сигналов синхронизации
VR	–	<i>Virtual Reality</i> Виртуальная реальность
WUS	–	<i>Wake-Up Signal</i> Сигнал пробуждения (механизм энергосбережения)
XR	–	<i>Extended Reality</i> Расширенная реальность

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $T_A, f_{\tilde{T}_A}(t), \lambda_{T_A}$ – случайная длительность интервала до наступления события микромобильности, плотность (1.8) и параметр (1.13) экспоненциального распределения с.в. T_A
- $\Psi_B(x)$ и $\Phi_B(x)$ – случайные длительности интервала блокировки прямой видимости одним блокатором и интервала прямой видимости между ПУ и БС (1.16)
- $\alpha(x)$ – интенсивность появления блокаторов прямой видимости между ПУ и БС (1.15)
- $\gamma(x)$ – случайная длительность интервала прямой видимости между БС и ПУ, находящимся от нее на 2D расстоянии x , (1.14)
- $\sigma(x)$ – случайная длительность интервала нахождения хотя бы одного блокатора в зоне блокировки прямой видимости между БС и ПУ, находящимся от нее на 2D расстоянии x , (1.19)
- x, y – 2D и 3D расстояние между фазовыми центрами ФАР ПУ и БС
- $x(i)$ – 2D расстояние между ПУ и i -й БС, $i = 1, \dots, N$
- $f_i(x)$, – функция $f_i(x)$ плотности 2D расстояния $x(i)$ до i -й БС, $i = 1, \dots, N$, (1.27)
- $p_B(x)$ – вероятность блокировки прямой видимости между БС и ПУ, находящимся от нее на 2D расстоянии x , (1.28)
- $p_{N,i}$ – вероятность блокировки прямой видимости между ПУ и i -й БС, $i = 1, \dots, N$, (1.26)
- p_N – вероятность потери ПУ связи с сетью (вероятность одновременной блокировки прямой видимости между ПУ и всеми N БС), (1.25)

- $P_{L,i}$ – вероятность выбора i -й БС в качестве опорной, $i = 1, \dots, N$, (1.30)
- $P_{S,i}$ – вероятность нахождения ПУ в спящем режиме при попытке опорной i -й БС начать передачу пользовательских данных, $i = 1, \dots, N$, (1.44)
- $P_{B,i}$ – вероятность нарушения выравнивания лучей ПУ и опорной i -й БС в результате макромобильности, (1.28)
- $p_{B,i}$ – вероятность того, что i ближайших доступных БС одновременно заблокированы, $i = 1, \dots, N$, (1.29)
- $T_{W,i}$ – случайная суммарная длительность интервалов простоя $T_{W,i}$ канала PDSCH передачи пользовательских данных от i -й БС в течение RRC-соединения с i -й БС, $i \in \{1, \dots, N\}$, (1.43)
- $T_L, f_{T_L}^{base}(t), \gamma(x)$ – случайная длительность интервала до наступления события макромобильности ПУ без функции мультисвязности с БС на расстоянии x , плотность (1.18) и параметр (1.14) экспоненциального распределения с.в. T_L
- $T_{L2,i}, f_{T_{L2,i}}^{dual}(t), \gamma(x(i))$ – случайная длительность интервала до наступления события макромобильности с i -й БС на расстоянии $x(i)$ с плотностью (1.2), плотность (2.7) и параметр (1.14) экспоненциального распределения с.в. $T_{L2,i}$
- $T_L^{RRM}, F_{T_L}^{RRM}(t)$ – случайная длительность интервала до наступления события макромобильности, плотность (3.24) распределения с.в. T_L^{RRM}
- $T_{NL}, f_{T_{NL}}^{base}(t), \sigma(x)$ – случайная длительность интервала отсутствия связи с сетью для ПУ без функции мультисвязности, плотность (1.20) и параметр (1.19) экспоненциального распределения с.в. T_{NL}

- $T_{NL,i}, f_{T_{NL2,i}}^{dual}(t), \sigma(x(i))$ – случайная длительность интервала отсутствия прямой видимости между ПУ и i -й БС на расстоянии $x(i)$ с плотностью (1.27), плотность (2.8) и параметр (1.19) экспоненциального распределения с.в с.в. $T_{NL2,i}$
- $f_{C,i}^{base}(t)$ – плотность случайной длительности RRC-соединения i -й БС до момента рассогласования лучей антенн ПУ и БС из-за блокировки прямой видимости между ПУ и БС или микромобильности ПУ, $i = 1, \dots, N$, (1.36)
- $f_{C,i,k}^{dual}(t)$ – плотность случайной длительности RRC-соединения до момента рассогласования лучей антенн ПУ и i -й БС из-за микро- или макромобильности, $i = 1, \dots, N$, либо завершения пользователем сессии приложения k , $k = 1, \dots, N_{App}$, (2.13)
- $f_C^{RRM}(t)$ – плотность распределения случайной длительности RRC-соединения до момента рассогласования лучей антенн ПУ и БС из-за микро- или макромобильности, либо смены режима механизма RRM, (3.30)
- N_{App} – число приложений, запускаемых пользователем на ПУ
- $p_{A,k}$ – условная вероятность при запуске на ПУ приложения выбрать приложение k , $k = 1, \dots, N_{App}$
- $T_{A,k}$ – средняя длительность сессии запущенного на ПУ приложения k , $k = 1, \dots, N_{App}$, (2.6)
- $\lambda_O, T_O, \lambda_{O,k}, T_{O,k}$ – параметр λ_O экспоненциального распределения случайной длительности интервала T_O активной передачи пользовательских данных («on» mode) и параметр $\lambda_{O,k}$ - интервала $T_{O,k}$ активной передачи пользовательских данных приложения k , $k = 1, \dots, N_{App}$
- $\lambda_S, T_S, \lambda_{S,k}, T_{S,k}$ – параметр λ_S экспоненциального распределения случайной длительности интервала T_S паузы

передачи пользовательских данных («standby» mode) и параметр $\lambda_{S,k}$ - интервала $T_{S,k}$ паузы передачи пользовательских данных приложения k , $k = 1, \dots, N_{App}$

T_B	– длительность процедур поиска луча и поиска радиоканала
λ_{observ}	– параметр экспоненциального распределения случайной длительности интервала наблюдения для расчета энергопотребления ПУ
x, y	– 2D- и 3D-расстояние между фазовыми центрами ФАР БС и ПУ
G	– средний коэффициент усиления антенны, (1.2)
G_A, G_U и $G_A(t), G_U(t)$	– средние коэффициенты усиления и коэффициенты усиления в момент t по главному лепестку антенны БС и антенны ПУ
$S(y)$	– значение отношения сигнал-шум на принимающем устройстве (SINR) на 3D расстоянии y , (1.4)
$S(t, d(t))$	– значение отношения сигнал-шум (SINR) на подвижном принимающем устройстве в момент времени t на 2D расстоянии $d(t)$, (3.26)
N_0	– тепловой шум
I_M	– граница интерференции
A, P_T	– мощность передатчика
$L_{dB}(y)$	– затухание (потери мощности радиосигнала), (1.3)
λ_A, λ_B	– плотность БС, блокаторов [м^{-2}]
$(x(t), y(t))$ и $(\phi(t), \theta(t))$	– координаты фазового центра ФАР, углы места и азимута оси антенны приемопередающего устройства
$\Delta x, \Delta y, \Delta \phi, \Delta \theta$	– средние скорости смещения ПУ по оси $0x$ и оси $0y$ [м/с], средние угловые скорости изменения угла места и угла азимута направления луча антенны ПУ [рад/с]
N_A, N_U	– число антенных элементов ФАР БС и ФАР ПУ

- α, β – угловая ширина луча антенны БС и ПУ для круговой конической модели антенны
- β_H и β_V – угловая ширина луча антенны ПУ в горизонтальной (азимут) и вертикальной (место) плоскостях для эллиптической конической модели антенны
- $\mu_x, \mu_y, \mu_\phi, \mu_\theta$ – средние значения смещения ПУ по оси $0x$, оси $0y$, изменения угла места, угла азимута направления луча антенны ПУ
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\phi, \sigma_\theta$ – среднеквадратические отклонения смещения ПУ по оси $0x$, оси $0y$, изменения угла места, угла азимута направления луча антенны ПУ
- ε и $\rho(\theta)$ – параметр и функция направленности для углового отклонения θ
- $G(\phi, \theta)$ – коэффициент усиления антенны для угловых отклонений ϕ и θ оси луча антенны рассматриваемого устройства от прямой, соединяющей фазовые центры антенн приемопередающих устройств в вертикальной (угол места) и горизонтальной (угол азимута) плоскостях, (3.10)
- h_U, h_A, h_B – высота ПУ, БС, блокатора
- r_B, v_B – радиус [м], скорость перемещения блокатора [м/с]
- $X(t), Y(t), Z_H(t), Z_V(t)$ – одномерные диффузионные процессы изменения координат ПУ осям $0x$ и $0y$, изменения угла азимута и угла места оси луча антенны ПУ за время t , (3.2), (3.8)
- $B(t)$ – Марковский процесс отсутствия/наличия прямой видимости между ПУ и БС в момент t , $B(t) \in \{0,1\}$, с матрицей переходных вероятностей за время t (3.11) и начальным распределением (3.13)
- D, D_γ – коэффициент диффузии диффузионного процесса $X(t)$ (3.1), $Z(t)$ (3.7)

- e_{SSB}, e_{RACH}, \dots – константы энергопотребления ПУ из Табл.1.1, Табл. 2.4
- $S_E, S_{E,i}^{DRX}, E[S_{E,i}],$
 $E[S_{E,i}^{dual}],$
 $E[S_E^{RRM}]$ – спектральная эффективность радиоканала по определению (1.21); между ПУ и i -й БС с учетом времени простоя (1.45); средняя спектральная эффективность между ПУ и i -й БС по теореме Шеннона-Хартли (1.46), $i = 1, \dots, N$; при двойном подключении (2.23); при комбинации механизмов энергосбережения (3.33)
- $P_C, P_{C,i}^{DRX}, P_C^{dual},$
 P_C^{RRM} – энергопотребление ПУ по определению (1.22); при взаимодействии с i -й БС, $i = 1, \dots, N$, (1.42); при двойном подключении (2.22); при комбинации механизмов энергосбережения (3.34)
- $P_E, P_{E,i}^{DRX}, P_E^{dual},$
 $E[P_E^{RRM}]$ – энергоэффективность ПУ по определению (1.23); при взаимодействии с i -й БС без функции мультисвязности (1.47); при двойном подключении, $i = 1, \dots, N$, (2.23); при комбинации механизмов энергосбережения (3.35)
- $B_T, E[B_T^{dual}],$
 $E[B_T^{RRM}]$ – время работы батареи ПУ по определению (1.24); среднее время работы батареи ПУ при двойном подключении (2.25); при комбинации механизмов энергосбережения (3.36)

Таблица О.1. Две базовые одноуровневые цепи Маркова для моделирования состояний ПУ с учетом мультисвязности и механизма энергосбережения

DRX

Глава 1			
	---	<i>Мультисвязность (multiconnectivity)</i>	<i>Базовый механизм энергосбережения DRX</i>
<i>ЦМ</i>		$\{\nu_n^{multi}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{multi}$	$\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{DRX}$
<i>Пространство состояний</i>		$\mathbb{X}^{multi} = \{0, 1, \dots, 3N\}$	$\mathbb{Y}^{DRX} = \{0, 1, \dots, 7\}$
<i>Начальное распределение ЦМ</i>		$\boldsymbol{\pi}^{multi} = (\pi_i^{multi})_{i \in \mathbb{X}^{multi}}$ (1.32)	$\boldsymbol{\pi}^{DRX} = (\pi_i^{DRX})_{i \in \mathbb{Y}^{DRX}}$ (1.35)
<i>Матрица переходных вероятностей</i>		$\mathbf{Q}^{multi} = [q_{ij}^{multi}]_{i,j \in \mathbb{X}^{multi} \setminus \{0\}}$	$\mathbf{W}^{DRX} = [w_{ij}^{DRX}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}}$ (1.37) -(1.40), (1.48) – (1.57)
<i>Среднее число посещений ЦМ состояния j</i>		$n_j^{multi}, j \in \mathbb{X}^{multi} \setminus \{0\}$ (1.34)	$n_j^{DRX}, j \in \mathbb{Y}^{DRX} \setminus \{0\}$ (1.41)

Таблица О.2. Трехуровневая цепь Маркова для моделирования состояний ПУ
в трех сценариях двойного подключения (dual)

Глава 2			
	<i>Уровень I.</i> Приложения на ПУ пользователя	<i>Уровень II.</i> Двойное подключение (dual connectivity)	<i>Уровень III.</i> DRX Dual
<i>ЦМ</i>	$\{\chi_n^{dual}, n \geq 0\}$ $\in \mathbb{Z}^{dual}$	$\{v_n^{(m)}, n \geq 0\} \in \mathbb{X}^{(m)},$ $m = 1,2,3$	$\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\}$ $\in \mathbb{Y}^{dual}$
<i>Пространст во состояний</i>	\mathbb{Z}^{dual} $= \{1, \dots, N_{App}, Idle, End\}$	$\mathbb{X}^{(1)}$ $= \{MN, SN, MM, SM, O, EoS\}$ $\mathbb{X}^{(2)}$ $= \{MN, SN, MM, SM, EoS\}$ $\mathbb{X}^{(3)}$ $= \{MN, SN, MM, EoS\}$	\mathbb{Y}^{dual} $= \{0, 1, \dots, 7\}$
<i>Начальное распределени е ЦМ</i>	π_{L1}^{dual} $= (\pi_{L1,i}^{dual})_{i \in \mathbb{Z}^{dual}}$ (2.1)	$\pi_{L2}^{(m)} = (\pi_{L2,i}^{(m)})_{i \in \mathbb{X}^{(m)}}$ (2.4)	π_{L3}^{dual} $= (\pi_{L3,i}^{dual})_{i \in \mathbb{Y}^{dual}}$ (2.14)
<i>Матрица переходных вероятносте й</i>	$\mathbf{U}^{dual} = [u_{ij}^{dual}], i, j$ $\in \{1, \dots, N_{App}, Idle\}$ (2.2)	$\mathbf{Q}^{(m)}$ $= [q_{ij}^{(m)}]_{i,j \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}}$ (2.10) - (2.12)	\mathbf{W}^{dual} $= [w_{ij}^{dual}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{dual} \setminus \{0\}}$ (2.15), (2.26) – (2.30)
<i>Ср. число посещений состояния j</i>	$n_{L1}^{dual}, j \in \mathbb{Z}^{dual} \setminus$ $\{End\}$ (2.3)	$n_{L2,j}^{(m)}, j \in \mathbb{X}^{(m)} \setminus \{EoS\}$ (2.9)	$n_{L3,j}^{dual}, j \in \mathbb{Y}^{dual}$ $\setminus \{0\}$ (2.16)

Таблица О.3. Двухуровневая цепь Маркова для моделирования режимов механизма релаксации управления радиоресурсами (RRM)

Глава 3			
	Уровень I. Режимы RRM	---	Уровень II. Комбинации механизмов DRX, WUS
ЦМ	$\{\chi_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Z}^{RRM}$		$\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$
Пространство состояний	\mathbb{Z}^{RRM} = {Full RRM, RRM – rel., Full RRM – Micromobility, RRM – rel. – Micromobility, Blocked }		$\mathbb{Y}^{RRM} = \{0, 1, \dots, 10\}$
Начальное распределение ЦМ	$\pi_{L1}^{RRM} = (\pi_{L1,i}^{RRM})_{i \in \mathbb{Z}^{RRM}}$ (3.27)		$\pi_{L2}^{RRM} = (\pi_{L2,i}^{RRM})_{i \in \mathbb{Y}^{RRM}}$ (3.29)
Матрица переходных вероятностей	$\mathbf{U}^{RRM} = [u_{ij}^{RRM}], i, j \in \mathbb{Z}^{RRM}$		$\mathbf{W}^{RRM} = [w_{ij}^{RRM}]_{i, j \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}}$
Среднее число посещений ЦМ состояния j	$n_{L1,j}^{RRM}, j \in \mathbb{Z}^{RRM} \setminus \{\text{Blocked}\}$ (3.28)		$n_{L2,j}^{RRM}, j \in \mathbb{Y}^{RRM} \setminus \{0\}$ (3.32)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксёнова А. В., Голос Е. С., Бесчастный В. А., Острикова Д. Ю., Гайдамака Ю. В. Модель энергопотребления устройства в режиме прерывистого приёма DRX в сети 5G NR // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 18–22 апреля 2022 г. – Москва, 2022. – С. 85–91.
2. 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 RU 2022619091 / 19.05.2022. – 1 с.
3. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика. – Москва : РУДН, 2009. – 342 с.
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. 69–81. – DOI: 10.14357/08696527230407.
5. Бочаров П. П., Печинкин А. В. Теория массового обслуживания : учебник. – Москва : Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
6. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – Москва : Техносфера, 2003. – 512 с.
7. Вишневский В. М., Дудин А. Н., Клименок В. И. Стохастические системы с корреляционными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. – Москва : Техносфера, 2018. – 564 с.
8. Голос Е. С. Анализ влияния расположения пользователей в соте сети 5G/6G на спектральную эффективность // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции

- с международным участием. Москва, РУДН, 08–12 апреля 2024 г. – Москва, 2024. – С. 121–128.
9. 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 // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 17–21 апреля 2023 г. – Москва, 2023. – С. 59–62.
10. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пост-NGN. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. – 160 с.
11. Горбачева Л. С., Парамонов А. И. Модели показателей качества обслуживания для трафика роботов-манипуляторов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 13–19.
12. Горцев А. М., Назаров А. А., Терпугов А. Ф. Управление и адаптация в системах массового обслуживания. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 1978. – 208 с.
13. Зейфман А. И., Бенинг В. Е., Соколов И. А. Марковские цепи и модели с непрерывным временем. – Москва : Элекс-КМ, 2008. – 167 с. |
14. Кашкаров Д. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Модель и метод использования множественных связей для реализации сверхнадежных соединений в сети 5G // Электросвязь. – 2021. – № 8. – С. 16–22.
15. Конюхов Р. И., Голос Е. С., Дараселия А. В., Сопин Э. С., Самуйлов 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 RU 2022660566 / 06.06.2022. – 1 с.
16. Корнышев Ю. Н., Пшеничников А. П., Харкевич А. Д. Теория телетрафика : учебник для вузов. – Москва : Радио и связь, 1996. – 272 с.

17. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Кучерявый Е. А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. – Москва : ФГУП ЦНИИС, 2008. – 296 с.
18. Маслов А. А., Себекин Г. В., Степанов М. С., Степанов С. Н., Щурков А. О. Модель обслуживания мультисервисного трафика в узле доступа спутниковой сети связи с динамически изменяемой скоростью предоставления сервисов // Автоматика и телемеханика. – 2025. – № 11. – С. 75–91.
19. Назаров А. А., Моисеева С. П. Метод асимптотического анализа в теории массового обслуживания : монография. – Томск : Изд-во Научно-технической литературы, 2006. – 109 с.
20. Назаров А. А., Терпугов А. Ф. Теория вероятностей и случайных процессов : учебное пособие. – Томск : Изд-во Научно-технической литературы, 2006. – 204 с.
21. 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 ее применения. – 2024. – Т. 18, № 2. – С. 32–39.
22. Пшеничников А. П., Даудов И. М. Концептуальные основы будущих сетей // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 24–28.
23. Разумчик Р. В., Зейфман А. И., Коротышева А. В., Сатин Я. А. Анализ энергоэффективности вычислительного комплекса, моделируемого с помощью системы обслуживания с пороговым управлением и интенсивностями, зависящими от времени // Системы и средства информатики. – 2015. – Т. 25, № 4. – С. 19–30.
24. Рыков В. В. Теория случайных процессов : конспект лекций. – Москва, 2008. – 233 с.
25. Сегайер А., Цитович И. И. Построение моделей мультисервисных сетей // Электросвязь. – 2009. – № 9. – С. 54–57.

26. Семенова О. В. Многопороговое управление системой массового обслуживания ВМАР/G/1 с МАР-потокм катастрофических сбоев // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 1. – С. 105–120.
27. Семенова О. В., Дудин А. Н. Система массового обслуживания M|M|N с управляемым режимом обслуживания и катастрофическими сбоями // Автоматика и вычислительная техника. – 2007. – № 6. – С. 72–80.
28. Степанов С. Н. Теория телетрафика концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. — 867 с.
29. Степанов С. Н., Степанов М. С. Планирование ресурса передачи при совместном обслуживании мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 11. – С. 79–93.
30. Степанов С. Н., Цитович И. И. Эквивалентные определения вероятностных характеристик моделей с повторными вызовами и их применение // Проблемы передачи информации. – 1989. – Т. 25, вып. 2. – С. 79–90.
31. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. Т. 1. Статика. Кинематика. – Москва : Высшая школа, 1984. – 343 с.
32. 3GPP. Advanced plans for 5G [Электронный ресурс]. – 3GPP, 2021. – Режим доступа: <https://www.3gpp.org/news-events/2210-advanced-5g>. |
33. 3GPP TS 138 104 V15.2.0. 5G ; NR ; base station (BS) radio transmission and reception (Release 15). – ETSI, 2018.
34. 3GPP TS 138 104 V16.19.0. 5G ; NR ; Integrated Access and Backhaul (IAB) radio transmission and reception (Release 16). – ETSI, 2024.
35. 3GPP TS 37.717 V17.0.0. Dual Connectivity (DC) of 1 LTE band (1DL/1UL) and 1 NR band (1DL/1UL) (Release 17). – 3GPP, 2022.
36. 3GPP TR 36.814 V9.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Further advancements for E-UTRA physical layer aspects. – 3GPP, 2010.

- 37.3GPP TS 36.331. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 15). – 3GPP, 2019. – 965 p.
- 38.3GPP TS 38.314 V18.0.0. NR ; Layer 2 measurements. – 3GPP, 2024.
- 39.3GPP TS 38.321 V15.0.0. NR ; Medium Access Control (MAC) protocol specification. – 3GPP, 2017.
- 40.3GPP TS 37.340 V16.0.0. NR ; Multi-connectivity ; stage 2 (Release 16). – 3GPP, 2019.
- 41.3GPP TS 37.340 V18.5.0. NR ; Multi-connectivity ; overall description ; Stage-2. – 3GPP, 2025.
- 42.3GPP TS 38.331 V15.6.0. NR ; Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 15). – 3GPP, 2019.
- 43.3GPP TS 25.331 V8.1.0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 8). – 3GPP, 2008. – 1446 p.
- 44.3GPP TS 38.133. NR ; Requirements for support of radio resource management. – 3GPP, 2017.
- 45.3GPP TR 38.838 V17.0.0. Study on XR (extended reality) evaluations for NR (Release 17). – 3GPP, 2021.
- 46.3GPP TR 38.840 V16.0.0. Study on user equipment (UE) power saving in NR (Release 16). – 3GPP, 2019.
- 47.3GPP TR 38.901 V14.1.1. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 14). – 3GPP, 2017.
- 48.3GPP TS 38.413. NG-RAN ; NG Application Protocol (NGAP). – 3GPP, 2018.
- 49.3GPP TS 38.913 V16.0.0. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (Release 16). – 3GPP, 2020.
- 50.3GPP TR 25.927. Study on Solutions for Energy Saving within UTRA Node B. – 3GPP, 2015.

- 51.3GPP TR 36.927. Study on Potential solutions for energy saving for E-UTRAN. – 3GPP, 2011.
- 52.3GPP TR 38.875 V17.0.0. Study on support of reduced capability NR devices (Release 17). – 3GPP, 2021.
- 53.3GPP TS 36.321. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Medium Access Control (MAC) protocol. – 3GPP, 2008.
- 54.3GPP TR 37.977 V17.0. Universal terrestrial radio access (UTRA) and evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) ; verification of radiated multi-antenna reception performance of user equipment (UE). – 3GPP, 2022.
- 55.Alzaghir A., Paramonov A., Koucheryav A. Estimation of Quality of Service in Tactile Internet, Augmented Reality and Internet of Things // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Vol. 13158 LNCS. – P. 35–45. – DOI: 10.1007/978-3-030-97777-1_4.
- 56.Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. – John Wiley & Sons, 2015.
- 57.Basharin G., Gaidamaka Y., Samouylov K. Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of next generation networks // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – Vol. 47. – P. 62–69.
- 58.Begishev V., Moltchanov D., Sopin E., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Quantifying the impact of guard capacity on session continuity in 3GPP New Radio systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, no. 12. – P. 12345–12359.
- 59.Begishev V., Sopin E., Moltchanov D., Kovalchukov R., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Joint use of guard capacity and multiconnectivity for improved session continuity in millimeter-wave 5G NR systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70. – P. 2657–2672.
- 60.Begishev V., Sopin E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Performance analysis of multi-

- band microwave and millimeter-wave operation in 5G NR systems // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2021. – Vol. 20, no. 6. – P. 3475–3490.
61. Beschastnyi V., Ostrikova D., Konyukhov R., Golos E., Chursin A., Moltchanov D., Gaidamaka Y. Quantifying the density of mmWave NR deployments for provisioning multi-layer VR services // *Future Internet*. – 2021. – Vol. 13, no. 7. – P. 185.
62. Beschastnyi V., Ostrikova D., Moltchanov D., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y., Samouylov K. Balancing latency and energy efficiency in mmWave 5G NR systems with multiconnectivity // *IEEE Communications Letters*. – 2022. – Vol. 26. – P. 1952–1956.
63. Bocharov P. P., D'Apice C., Pechinkin A. V., Salerno S. *Queueing Theory*. – Brill Academic Publishers, 2004. – 457 p.
64. Constantine A. B. et al. *Antenna theory: analysis and design // Microstrip Antennas*. – John Wiley & Sons, 2005.
65. Cudak M., Ghosh A., Ghosh A., Andrews J. Integrated Access and Backhaul: A key enabler for 5G millimeter-wave deployments // *IEEE Communications Magazine*. – 2021. – Vol. 59, no. 4. – P. 88–94. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2000690.
66. Dohler M., Li Y. *Wireless Relay Channel in Cooperative Communications: Hardware, Channel & Phy*. – John Wiley & Sons, 2010. – 464 p.
67. Dusza B., Ide C., Cheng L., Wietfeld C. An accurate measurement-based power consumption model for LTE uplink transmissions // *2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. – 2013. – P. 49–50.
68. Efrosinin D., Kochetkova I., Samouylov K., Stepanova N. Algorithmic analysis of a two-class multi-server heterogeneous queueing system with a controllable cross-connectivity // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2020. – Vol. 12023 LNCS. – P. 1–17.

69. Ericsson. Leveraging the potential of 5G millimeter wave [Электронный ресурс] // Ericsson. – Stockholm, 2021. – Режим доступа: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/further-insights/leveraging-the-potential-of-5g-millimeter-wave>.
70. ETSI ES 203 228 V1.1.1. Environmental Engineering (EE) ; Assessment of mobile network energy efficiency. – ETSI, 2015. – 22 p. |
71. Gapeyenko M., Moltchanov D., Andreev S., Heath R. W. Line-of-sight probability for mmWave-based UAV communications in 3D urban grid deployments // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021. – Vol. 20. – P. 6566–6579.
72. Gapeyenko M., Petrov V., Moltchanov D., Akdeniz M. R., Andreev S., Himayat N., Koucheryavy Y. On the degree of multi-connectivity in 5G millimeter-wave cellular urban deployments // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, no. 2. – P. 1973–1978.
73. Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S., Aryafar E., Yeh S.-p., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Y. Analysis of human-body blockage in urban millimeter-wave cellular communications // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, 2016. – P. 1–7.
74. Gapeyenko M., Petrov V., Moltchanov D., Andreev S., Himayat N., Koucheryavy Y. On the temporal effects of mobile blockers in urban millimeter-wave cellular scenarios // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2017. – Vol. 66. – P. 10124–10138.
75. Gelenbe E., Lent R., Douratsos M. Choosing a Local or Remote Cloud // 2012 Second Symposium on Network Cloud Computing and Applications. – 2012. – P. 25–30. – DOI: 10.1109/NCCA.2012.16.
76. Gerasimenko M., Moltchanov D., Gapeyenko M., Andreev S., Koucheryavy Y. Capacity of multiconnectivity mmWave systems with dynamic blockage and directional antennas // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, no. 4. – P. 3534–3549.

- 77.GSMA. 5G mmWave guide: A resource for operators. – London : GSM Association, 2022. – 54 p.
- 78.GSMA CLP.11. Battery Life Measurement and Current Consumption Technique. Version 11.0. – GSMA, 2021.
- 79.Ichkov A., Gehring I., Mähönen P., Simić L. Millimeter-wave beam misalignment effects of small-and large-scale user mobility based on urban measurements // Proceedings of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems. – 2021. – P. 13–18.
- 80.ITU-R Rec. M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. – ITU-R, 2015.
- 81.Iversen V. B. Teletraffic Engineering Handbook. – Technical University of Denmark, 2002. – 324 p.
- 82.Kelly F. P. Reversibility and stochastic networks. – Cambridge University Press, 2011. – 238 p.
- 83.Kemeny J. G., Snell J. L. Finite Markov chains. – Van Nostrand Princeton, NJ, 1960. – Vol. 356.
- 84.Kim T., Kim Y., Lin Q., Sun F., Fu J., Kim Y., Papasakellariou A., Ji H., Lee J. Evolution of power saving technologies for 5G New Radio // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 198912–198924.
- 85.Kleinrock L. Queuing systems, volume 1: Theory. – Wiley New York, 1976. – Vol. 66.
- 86.Kovalchukov R., Moltchanov D., Samuylov A., Ometov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Evaluating SIR in 3D millimeter-wave deployments: Direct modeling and feasible approximations // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – Vol. 18, no. 2. – P. 879–896.
- 87.Lauridsen M., Laselva D., Frederiksen F., Kaikkonen J. 5G New Radio user equipment power modeling and potential energy savings // 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). – 2019. – P. 1–6.

88. Li H., He Q., Zhang X., Sun C. Radio resource management measurement relaxation on reduced capability new radio devices // 2022. – P. 424–428. – DOI: 10.1109/ICPICS55264.2022.9873773.
89. Li Y.-N. R., Chen M., Xu J., Tian L., Huang K. Power saving techniques for 5G and beyond // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108675–108690.
90. Liu H.-H., Lin K.-H., Wei H.-Y. NR DCP: An enhanced power saving mechanism with wake-up signal enabled DRX // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. – 2024. – Vol. 8, no. 1. – P. 2–17. – DOI: 10.1109/TGCN.2023.3312707.
91. MacCartney G. R., Deng S., Sun S., Rappaport T. S. Millimeter-wave human blockage at 73 GHz with a simple double knife-edge diffraction model and extension for directional antennas // 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). – IEEE, 2016. – P. 1–6.
92. MacCartney G. R., Rappaport T. S., Rangan S. Rapid fading due to human blockage in pedestrian crowds at 5G millimeter-wave frequencies // GLOBECOM 2017 – 2017 IEEE Global Communications Conference. – IEEE, 2017. – P. 1–7.
93. Mahmood O. A., Khakimov A., Muthanna A., Paramonov A. Effect of Heterogeneous Traffic on Quality of Service in 5G Network // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11965 LNCS. – P. 469–478. – DOI: 10.1007/978-3-030-36614-8_36.
94. Medvedeva E., Zaripova E., Semenova O., Vlaskina A., Gudkova I., Gaidamaka Y. Discrete time Markov chain model for analyzing characteristics of RACH procedure under massive machine type communications // ACM International Conference Proceeding Series. 2. Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS 2018. – 2018. – P. 59.
95. Méndez-Rial R., Rusu C., González-Prelcic N., Alkhateeb A., Heath R. W. Hybrid MIMO architectures for millimeter wave communications: Phase shifters or switches? // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 247–267.

96. Moiseev A., Shklennik M., Polin E. Infinite-server queueing tandem with Markovian arrival process and service depending on its state // *Annals of Operations Research*. – 2023. – Vol. 326. – P. 261–279.
97. Moiseeva S. P., Turenova I. A., Imomov A. A. Asymptotic Analysis of Multi-Arrival Heterogenous Resource Queueing System MMPP/GI(2)/ ∞ in a Random Markovian Environment // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. – 2025. – Vol. 18, no. 6. – P. 770–781.
98. Moltchanov D. Distance distributions in random networks // *Elsevier Ad Hoc Networks*. – 2012. – Vol. 10. – P. 1146–1166.
99. Moltchanov D., Gaidamaka Y., Ostrikova D., Beschastnyi V., Koucheryavy Y., Samouylov K. Ergodic outage and capacity of terahertz systems under micromobility and blockage impairments // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2021. – P. 1–16.
100. Moltchanov D., Ometov A., Andreev S., Koucheryavy Y. Upper bound on capacity of 5G mmWave cellular with multi-connectivity capabilities // *Electronics Letters*. – 2018. – Vol. 54. – P. 724–726.
101. Moltchanov D., Samuylov A., Lisovskaya E., Kovalchukov R., Begishev V., Sopin E., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y. Performance characterization and traffic protection in street multi-band millimeter-wave and microwave deployments // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2021. – Vol. 21, no. 1. – P. 163–178.
102. Nain P., Towsley D., Liu B., Liu Z. Properties of random direction models // *IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. – 2005. – Vol. 3. – P. 1897–1907.
103. Naumov V., Gaidamaka Y., Yarkina N., Samouylov K. *Matrix and Analytical Methods for Performance Analysis of Telecommunication Systems*. – Springer Nature Switzerland AG, 2021.
104. Naumov V., Samouylov K., Yarkina N., Sopin E., Andreev S., Samuylov A. LTE performance analysis using queueing systems with finite resources and random requirements // *Proceedings of the 7th International Congress on Ultra*

- Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2015. – P. 100–103.
105. Ostriкова D., Beschastnyi V., Moltchanov D., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y., Samouylov K. Battery Lifetime and Power Consumption in 5G Systems with Intra- and Inter-RAT Dual-Connectivity // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2024. – Vol. 23, no. 5. – P. 5511–5526. – DOI: 10.1109/TMC.2023.3311348.
 106. Ostriкова D., Beschastnyi V. A., Moltchanov D., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y., Samouylov K. E. System-level analysis of energy and performance trade-offs in mmWave 5G NR systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2023. – Vol. 22, no. 11. – P. 7304–7318.
 107. Ostriкова 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. – Vol. 16, no. 7. – P. 240.
 108. Özkoç M. F., Koutsaftis A., Kumar R., Liu P., Panwar S. S. The impact of multi-connectivity and handover constraints on millimeter wave and terahertz cellular networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2021. – Vol. 39, no. 6. – P. 1833–1853.
 109. Perdomo J., Ericsson M., Nordberg M., Andersson K. User performance in a 5G multi-connectivity ultra-dense network city scenario // 2020 IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN). – IEEE, 2020. – P. 195–203.
 110. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J. M., Koucheryavy Y. Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – Vol. 16. – P. 1791–1808.
 111. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Jornet J. M. Capacity and outage of terahertz communications with user micro-mobility and beam misalignment // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020.

112. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Jornet J. M. The effect of small-scale mobility on terahertz band communications // Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication. – 2018. – P. 1–2.
113. Poirot V., Ericson M., Nordberg M., Andersson K. Energy efficient multi-connectivity algorithms for ultra-dense 5G networks // Wireless Networks. – 2019. – P. 2207–2222.
114. Polese M., Giordani M., Mezzavilla M., Rangan S., Zorzi M. Improved handover through dual connectivity in 5G mmWave mobile networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2017. – Vol. 35, no. 9. – P. 2069–2084.
115. Pramanik P. K. D., Sinhababu N., Mukherjee B., Padmanaban S., Maity A., Upadhyaya B. K., Holm-Nielsen J. B., Choudhury P. Power consumption analysis, measurement, management, and issues: A state-of-the-art review of smartphone battery and energy usage // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 182113–182172. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2958684.
116. Rappaport T. S., Xing Y., MacCartney G. R., Molisch A. F., Mellios E., Zhang J. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks – with a focus on propagation models // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Vol. 65, no. 12. – P. 6213–6230. – DOI: 10.1109/TAP.2017.2734243.
117. Rappaport T. S., Xing Y., MacCartney G. R., Molisch A. F., Mellios E., Zhang J. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 78729–78757.
118. Ribeiro L. N., Schwarz S., Rupp M., de Almeida A. L. Energy efficiency of mmWave massive MIMO precoding with low-resolution DACs // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2018. – Vol. 12, no. 2. – P. 298–312.
119. Risken H. Fokker–Planck Equation. – Springer, 1996.

120. Ross K. W. Multiservice loss models for broadband telecommunication networks. – London : Springer-Verlag, 1995. – 343 p.
121. Rostami S., Lagen S., Costa M., Valkama M., Dini P. Wake-up radio based access in 5G under delay constraints: Modeling and optimization // IEEE Transactions on Communications. – 2020. – Vol. 68. – P. 1044–1057.
122. Samuylov A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Gerasimenko M., Singh S., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Y. Characterizing spatial correlation of blockage statistics in urban mmwave systems // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). – 2016. – P. 1–7.
123. Sandvine. The mobile internet phenomena report. – Waterloo, Canada, 2021.
124. Series R. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems // Recommendation ITU-R. – 2015. – P. 530–12.
125. Shafie A., Yang N., Han C. Multi-connectivity for indoor terahertz communication with self and dynamic blockage // ICC 2020 – 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2020. – P. 1–7.
126. Shah S. H. A., Aditya S., Rangan S. Power-efficient beam tracking during connected mode DRX in mmWave and sub-THz systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2021. – Vol. 39, no. 6. – P. 1711–1724.
127. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, no. 3 (July). – P. 379–423 ; no. 4 (October). – P. 623–656.
128. Sharma L., Kumar B. B., Wu S.-L. Performance analysis and adaptive DRX scheme for dual connectivity // IEEE Internet of Things Journal. – 2019. – Vol. 6, no. 6. – P. 10289–10304.
129. Singh R., Sicker D. Parameter modeling for small-scale mobility in indoor THz communication // 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – IEEE, 2019. – P. 1–7.

130. Singh S., Mudumbai R., Madhow U. Interference analysis for highly directional 60-GHz mesh networks: The case for rethinking medium access control // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2011. – Vol. 19. – P. 1513–1527.
131. Sopin E., Moltchanov D., Daraseliya A., Koucheryavy Y., Gaidamaka Y. User association and multi-connectivity strategies in joint terahertz and millimeter wave 6G systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2022. – Vol. 71. – P. 12765–12781.
132. Stepanov M. S., Stepanov S. N., Andrabi U., Petrov D., Ndayikunda J. The Increasing of Resource Sharing Efficiency in Network Slicing Implementation // *Communications in Computer and Information Science*. – 2022. – Vol. 1552. – P. 18–35.
133. Stepanov N., Turlikov A., Begishev V., Koucheryavy Y., Moltchanov D. Accuracy assessment of user micromobility models for THz cellular systems // *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems*. – 2021. – P. 37–42.
134. Stepanov N. V., Moltchanov D., Begishev V., Turlikov A., Koucheryavy Y. Statistical analysis and modeling of user micromobility for THz cellular communications // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2021.
135. Tesema F. B., Awada A., Viering I., Simsek M., Fettweis G. P. Mobility modeling and performance evaluation of multi-connectivity in 5G intra-frequency networks // *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. – 2015. – P. 1–6.
136. Troegubov A. Y., Loginov V. A., Lyakhov A. I., Khorov E. M. Study of the Collision Resolution Method in New Radio Unlicensed Networks with Multichannel Access of Type A // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2022. – Vol. 67, no. Suppl 2. – P. S248–S254.
137. Wolfram Research, Inc. *Mathematica*, Version 14.2 [Электронный ресурс]. – Champaign, IL, 2025. – Режим доступа: <https://reference.wolfram.com/language/>.

138. Yarkina N., Gaidamaka Y., Correia L. M., Samouylov K. An analytical model for 5G network resource sharing with flexible SLA-oriented slice isolation // Mathematics. – 2020. – Vol. 8, no. 7.
139. Zarai F., Nicopolitidis P. Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems: Methodologies and Applications. – Morgan Kaufmann, 2015.

Приложение 1. Переходные вероятности ЦМ DRX

Элементы матрицы переходных вероятностей $\mathbf{W}^{DRX} = [w_{ij}^{DRX}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{DRX}}$ поглощающей ЦМ $\{\eta_n^{DRX}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{DRX}$ для базовой модели DRX для непрерывного соединения ПУ с сетью, получены ниже.

После периода «On Duration» ПУ может обнаружить пакеты, готовые к передаче переходом в рабочий режим в течение короткого сна C-DRX. Однако, этот переход возможен только при наличии активного соединения. Таким образом, вероятность задается как

$$w_{31}^{DRX} = \int_0^{t_{CSS}} f_{S,k}(x) dx \cdot \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy. \quad (1.48)$$

Если ПУ остается в режиме ожидания, оно переходит в режим сна. Если число последовательных циклов короткого сна не превышает n_{CSS} , то ПУ возвращается в состояние 2, в противном случае – в состояние 4, которое определено как (1.51).

Далее найдем среднее число переходов из состояния "On Duration" до поглощения. Это позволяет найти вероятность перехода из состояния "On Duration" в цикл длинного сна C-DRX, как показано ниже (теперь N_{SS} и N_{LS}):

$$p_{CLS} = d_{1,2N_{SS}+1} / \sum_{j=1}^{n_{CLS}} d_{1,2j+1} \quad (1.49)$$

Аналогично, можно найти другие вероятности переходов в различные циклы сна, p_{ISS} и p_{ILS} , итеративно расширяя цепочку коротких циклов с дополнительными состояниями для повторяющихся переходов. Переходы из состояния C-DRX короткого цикла "On Duration" могут быть найдены следующим образом

$$w_{3,2}^{DRX} = (1 - p_{CLS}) \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy. \quad (1.50)$$

$$w_{3,4}^{DRX} = p_{CLS} \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy. \quad (1.51)$$

Более того, если потеря связи происходит в течение короткого сна, ПУ переходит в состояние поглощения, т.е.,

$$w_{3,0}^{DRX} = \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_S(x) dx \quad (1.52)$$

Поскольку после DRX-сна всегда следует период "On Duration", вероятность перехода $w_{4,5} = 1$. Аналогично состоянию 3, вероятности перехода из состояния 5 в длинный сон рассчитываются так:

$$w_{5,4}^{DRX} = (1 - p_{ISS}) \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy. \quad (1.53)$$

Состояние 6 достигается, когда ПУ выполняет последовательные длинные сны n_{CLS} C-DRX и переходит в состояние RRC-Inactive, то есть:

$$w_{5,6}^{DRX} = p_{ISS} \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy. \quad (1.54)$$

Аналогично состоянию 3, в случае возврата в режим RRC-Connected, состояние 1, или потери соединения во время длительного сна, переходы из состояния 5 определяются следующим образом:

$$w_{5,1}^{DRX} = \int_0^{t_{CLS}} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_{C,i}^{base}(y) dy, \quad (1.55)$$

$$w_{5,0}^{DRX} = \int_0^{t_{CLS}} f_{C,i}^{base}(x) dx. \quad (1.56)$$

В наборе состояний RRC-Inactive существует аналогичное соответствие между парами состояний 6 и 2, 7 и 3. Чтобы их найти, необходимо заменить длительность времени сна, которые определены в таблице 1.2 [87], [126], [128]

Приложение 2. Переходные вероятности ЦМ dual

Элементы матрицы переходных вероятностей $\mathbf{W}^{dual} = [w_{ij}^{dual}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{RRM}}$ поглощающей ЦМ уровня III $\{\eta_n^{dual}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{dual}$ для анализа энергосбережения механизма DRX в сценариях двойного подключения, получены ниже.

Переход в состояние 2 происходит в том случае, если ПУ переходит в режим ожидания в течение таймера бездействия при условии, что не происходит отключения соединения, т. е.

$$w_{12}^{dual} = \int_0^{t_I+t_{on}} f_B(x) dx \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{C,i}^{dual}(y) dy. \quad (2.26)$$

Если соединение отключается в течение таймера бездействия, то цепь переходит в состояние поглощения с вероятностью

$$w_{1,0}^{dual} = \int_0^{t_I+t_{on}} f_{C,i}^{dual}(x) dx. \quad (2.27)$$

Единственным возможным результатом цикла сна является период "On Duration" (состояние 3), поэтому $w_{2,3}^{dual} = w_{4,5}^{dual} = 1$. После периода "On Duration" ПУ может вернуться в состояние 1 (передача данных) при условии, что некоторые данные для передачи поступили в течение короткого и длинного цикла сна соответственно.

$$w_{3,1}^{dual} = \int_0^{t_{SS}} f_I(x) dx \int_{t_{SS}}^{\infty} f_{C,i}^{dual}(y) dy, \quad (2.28)$$

$$w_{5,1}^{dual} = \int_0^{t_{LS}} f_I(x) dx \int_{t_{LS}}^{\infty} f_{C,i}^{dual}(y) dy$$

Другим вариантом для состояния "On Duration" является переход к другому циклу сна того же типа, если количество таких циклов не превышено, или с циклом более высокого порядка (длинный сон или пейджинг)

$$w_{j,k}^{dual} = \int_{t_j}^{\infty} f_I(y) \int_y^{\infty} f_{C,i}^{dual}(x) dx dy, \quad (2.29)$$

для периода " On Duration " после цикла сна типа j и следующего цикла типа k , где $k, j \in \{LS, PC\}$, где LS -длинный сон (Long Sleep). Заметим, что для числа циклов сна одного типа (короткого или длинного) цепь расширяется другими двумя состояниями для пары периодов сна и "On Duration". Последним исходом периода " On Duration" является отключение соединения, которое может произойти в пределах цикла сна с вероятностью

$$w_{j,0}^{dual} = \int_0^{t_j+t_{on}} f_{C,i}^{dual}(x) dx. \quad (2.30)$$

Отметим, что цикл пейджинга подразумевает ту же логику, что и циклы сна в (2.28) -(2.30). Таким образом, соответствующие вероятности переходов могут быть получены путем замены интервала "On Duration" на интервал пейджинга (состояние 7) и цикла сна на цикл пейджинга длиной, определяемой продолжительностью NR-кадра.

Приложение 3. Переходные вероятности ЦМ RRM

Элементы матрицы переходных вероятностей $\mathbf{W}^{RRM} = [w_{ij}^{RRM}]_{i,j \in \mathbb{Y}^{RRM}}$ поглощающей ЦМ уровня II $\{\eta_n^{RRM}, n \geq 0\} \in \mathbb{Y}^{RRM}$ для анализа энергосбережения механизма DRX, дополненного механизмом RRM-relaxation и механизмом WUS, получены ниже.

Чтобы перейти из состояния 1 в режим короткого сна DRX, ПУ должно быть активно, но при этом не должно быть данных, готовых к передаче:

$$w_{13}^{RRM} = \int_0^{t_M} f_{DL}(x) dx \int_{t_M}^{\infty} f_C^{RRM}(y) dy. \quad (3.40)$$

Если вышеуказанные условия не выполняются, ПУ переходит в состояние сна:

$$w_{1,0}^{RRM} = \int_0^{t_M} f_C^{RRM}(x) dx \quad (3.41)$$

Поскольку механизм RRM-релаксации запускается только при наличии на БС данных для передачи, после измерения уровня RSRP/RSRQ (состояние 2) ПУ всегда возвращается в состояние активной передачи данных (состояние 1). Выход ПУ из состояния сна (состояния 3 и 6) возможен только через проверку сигнала WUS (состояния 4 и 7), при этом после пробуждения начало активной передачи данных (состояние 1) возможно только после процедуры «On Duration» (состояния 5 и 8). Также заметим, что в режиме ожидания RRC-Inactive ПУ регулярно проверяет индикатор DCI (состояние 10). Это позволяет определить значения следующих переходных вероятностей как

$$w_{2,1}^{RRM} = w_{3,4}^{RRM} = w_{5,1}^{RRM} = w_{6,7}^{RRM} = w_{8,1}^{RRM} = w_{9,10}^{RRM} = 1. \quad (3.42)$$

Из короткого WUS (состояние 4) мы переходим обратно в состояние 3, если ПУ спит дольше, чем время короткого сна, t_{SS} :

$$w_{4,3}^{RRM} = \int_{t_{SS}}^{\infty} f_{RT}(x) dx \quad (3.43)$$

Для упрощения дальнейшего изложения обозначим $n_{SS}t_{SS} = m_{SS}$, где n_{SS} - максимальное фиксированное число повторений циклов короткого сна. В режиме DRX система может перейти в длинный сон, если в течение определенного количества циклов не будет обнаружено никаких данных.

$$w_{4,6}^{RRM} = \int_{m_{SS}}^{\infty} f_{RT}(x)dx \quad (3.44)$$

В качестве альтернативы, если данные обнаруживаются в течение определенного количества циклов, система переходит во включенное состояние «On Duration»:

$$w_{4,5}^{RRM} = \int_0^{t_{SS}} f_{RT}(x)dx \quad (3.45)$$

Ранее была определена вероятность перехода из короткого WUS. Как только ПУ завершит n_{SS} циклов короткого сна, оно переходит в состояние длительного сна. Из состояния длинного WUS ПУ возвращается в состояние длительного сна, если общее время циклов короткого сна ($n_{SS} \times t_{SS}$) и время длительного сна (t_{LS}), обозначенное как m_{SLS} , превышает определенное время, а именно:

$$w_{7,6}^{RRM} = \int_{m_{SLS}}^{\infty} f_{RT}(x)dx \quad (3.46)$$

В противном случае, если данные были обнаружены, система переходит в состояние «On Duration»:

$$w_{7,8}^{RRM} = \int_0^{m_{SLS}} f_{RT}(x)dx \quad (3.47)$$

Наконец, если данные не были обнаружены в течение более длительного периода времени, ПУ переходит в состояние 9, соответствующее состоянию RRC-Inactive:

$$w_{7,9}^{RRM} = \int_{m_{SSLS}}^{\infty} f_{RT}(x)dx \quad (3.48)$$

где $m_{SSLS} = n_{SS} t_{SS} + n_{LS} t_{LS}$, n_{LS} - максимальное фиксированное число повторений длинных циклов сна.

В противном случае, если данные не были обнаружены по истечении допустимого общего времени сна и времени пейджинга (t_{PC}), система переходит в активное состояние:

$$w_{10,1}^{RRM} = \int_0^{m_{SSLS}+t_{PC}} f_{RT}(x)dx \int_{m_{SSLS}+t_{PC}}^{\infty} f_C^{RRM}(y)dy \quad (3.49)$$

Если данных, готовых к передаче, не обнаружено, ПУ возвращается в состояние 9 и продолжает работу в режиме пейджинга, который фиксируется следующим образом:

$$w_{10,9}^{RRM} = \int_{m_{SSLS}+t_{PC}}^{\infty} f_{RT}(x)dx \int_{m_{SSLS}+t_{PC}}^{\infty} f_C^{RRM}(y)dy \quad (3.50)$$

Если происходит потеря активного соединения, ПУ переходит в состояние 0:

$$w_{10,0}^{RRM} = \int_0^{m_{SSLS}+t_{PC}} f_C^{RRM}(x)dx \quad (3.51)$$

Приложение 4. Доказательство леммы 3.2

Лемма 3.2. Угловые отклонения оси диаграммы направленности антенны ПУ $\theta(t)$ по горизонтали и $\phi(t)$ по вертикали спустя время t после момента t_0 завершения процедуры поиска луча при моделировании движения ПУ двумя независимыми диффузионными процессами $X(t)$ и $Y(t)$ по осям Ox и Oy , заданными (3.1), определяются формулами

$$\theta(t) = \left| \arccos \left[\frac{X(t)x_0 + (h_A - h_U)^2}{\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)^2 + Y(t)^2 + (h_A - h_U)^2]}} \right] \right|, \quad (3.5)$$

$$\phi(t) = \left| \arccos \left[\frac{\sqrt{[X(t)^2 + Y(t)^2]}}{\sqrt{[X(t)^2 + Y(t)^2 + (h_A - h_U)^2]}} \right] - \arccos \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right|, \quad (3.6)$$

$$t > t_0, \phi(t), \theta(t) \in [0, \pi].$$

Доказательство.

В соответствии с рис. 3.4

$$d_1 = x_0;$$

$$d_2 = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2};$$

$$l_1 = \sqrt{[d_1]^2 + (h_A - h_U)^2} = \sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2};$$

$$l_2 = \sqrt{[d_2]^2 + (h_A - h_U)^2} = \sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2};$$

$$d = \sqrt{[X(t) - x_0]^2 + [Y(t)]^2};$$

$$\beta_H(t_0) = 0 \text{ - угол азимута в момент } t_0.$$

По теореме косинусов из ΔCDP :

$$\beta_H(t) = \arccos \left[\frac{l_1^2 + l_2^2 - d^2}{2l_1l_2} \right] =$$

$$\arccos \left[\frac{x_0^2 + (h_A - h_U)^2 + [X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2 - [X(t) - x_0]^2 - [Y(t)]^2}{2\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)^2 + Y(t)^2 + (h_A - h_U)^2]}} \right] =$$

$$\arccos \left[\frac{X(t)x_0 + (h_A - h_U)^2}{\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)^2 + Y(t)^2 + (h_A - h_U)^2]}} \right] \text{ - угол азимута в момент } t.$$

По определению косинуса из ΔBCP :

$$\beta_V(t_0) = \arccos \left[\frac{d_1}{l_1} \right] = \arccos \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] - \text{УГОЛ МЕСТА В МОМЕНТ } t_0.$$

По определению косинуса из ΔBDP :

$$\beta_V(t) = \arccos \left[\frac{d_2}{l_2} \right] = \arccos \left[\frac{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}}{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] - \text{УГОЛ МЕСТА В МОМЕНТ } t.$$

Тогда

$$\theta = |\beta_H(t) - \beta_H(t_0)| = \arccos \left[\frac{X(t)x_0 + (h_A - h_U)^2}{\sqrt{[x_0^2 + (h_A - h_U)^2][X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right],$$

$$\phi = |\beta_V(t) - \beta_V(t_0)| = \left| \arccos \left[\frac{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2}}{\sqrt{[X(t)]^2 + [Y(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] - \right.$$

$$\left. \arccos \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (h_A - h_U)^2}} \right] \right|.$$

Лемма доказана.

Приложение 5. Оценка точности модели при комбинировании трех механизмов энергосбережения.

Для оценки точности математической модели главы 3 разработана имитационная модель в среде Matlab [139]. Для каждого набора параметров моделей механизмов энергосбережения выполнено 25 запусков имитационной модели, при каждом собрано 10^5 наблюдений в стационарном режиме работы системы. Стационарный режим определялся с помощью статистики скользящего среднего. Из-за большого размера статистических выборок показаны только точечные оценки.

Пример графиков для средней энергоэффективности ПУ для всех рассмотренных комбинаций механизмов энергосбережения при использовании приложения X-VR в зависимости от угловых скоростей микромобильности, полученных с помощью разработанной математической модели (3.31)-(3.34) и компьютерного имитационного моделирования методом Монте Карло, приведен на рис. 3.11. Остальные параметры имеют значения по умолчанию, приведенные в таблице 3.1. Рис. 3.11 показывает, что предложенная математическая модель хорошо согласуется с результатами моделирования, максимальная относительная погрешность не превышает 4%.

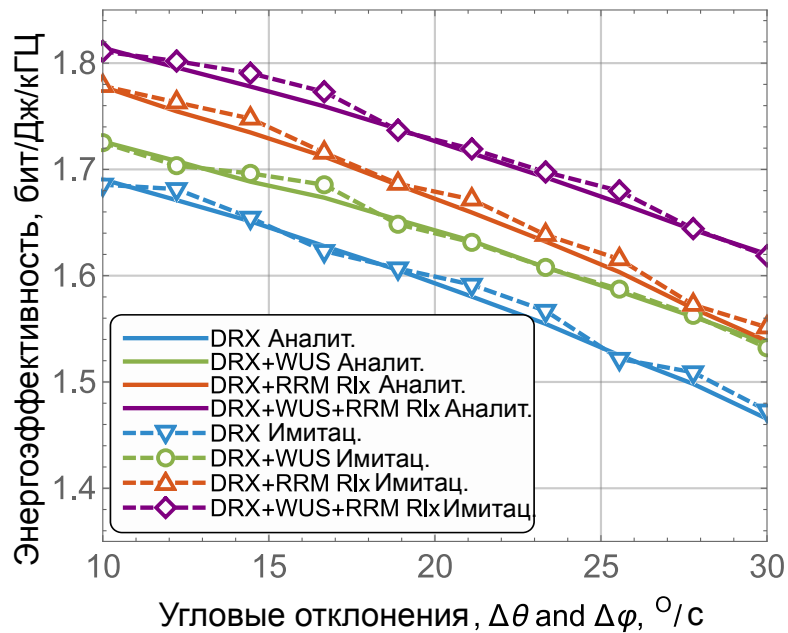


Рис. 3.11 Зависимость энергоэффективности ПУ от микромобильности (X-VR)