

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»**

Факультет физико-математических и естественных наук
Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей

«Допустить к защите»
Заведующий кафедрой
прикладной информатики
и теории вероятностей
д.т.н., профессор
_____ К.Е. Самуйлов
«___» _____ 20__ г.

**Выпускная квалификационная работа
магистра**

Направление 01.04.02 «Прикладная математика и информатика»

Магистерская программа «Теория вероятностей и математическая статистика»

ТЕМА «Исследование модели для анализа энергоэффективности передачи данных
в терагерцевом диапазоне»

Выполнил студент Голос Елизавета Сергеевна
(Фамилия, имя, отчество)

Группа НПМмд-02-20

Студ. билет № 1032202186

Руководитель выпускной
квалификационной работы

Гайдамака Ю.В.
д.ф.-м.н., проф., проф.
(Ф.И.О., степень, звание, должность)

(Подпись)

Автор
(Подпись)

г. Москва

2022 г.

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский университет дружбы народов»**

**АННОТАЦИЯ
выпускной квалификационной работы**

Голос Елизавета Сергеевна

(фамилия, имя, отчество)

на тему: «Исследование модели для анализа энергоэффективности передачи
данных в терагерцевом диапазоне»

Терагерцевые (ТГц) коммуникационные системы должны стать основной технологией воздушного интерфейса в сотовых системах шестого поколения (6G). Однако, используя чрезвычайно узкие диаграммы направленности излучения антенн как на стороне базовой станции (БС), так и на стороне пользовательского устройства (ПУ), эти системы подвержены влиянию не только динамических помех, но и микромобильности. Для смягчения влияния последнего фактора можно использовать механизм мультисвязности, позволяющий ПУ оставаться подключенным к нескольким БС одновременно и переключаться между ними в случае потери активного соединения. Но использование этой технологии ставит под угрозу энергоэффективность ПУ. В данной работе, используя инструменты стохастической геометрии и теории цепей Маркова, была разработана математическая модель, отражающая ключевые показатели энергопотребления и производительности как функцию от условий окружающей среды. Затем применены полученные данные для исследования компромиссов между производительностью пользователя и энергоэффективностью. Численные результаты показали, что для низкой скорости микромобильности и плотности блокаторов ниже $0,1 \text{ ед./м}^2$ два одновременно поддерживаемых канала приводят к оптимальной производительности. При более высокой плотности блокаторов для оптимизации энергоэффективности требуется более двух БС, а при высокой скорости микромобильности мультисвязность вообще не позволяет повысить энергоэффективность. Таким образом, оптимальная степень мультисвязности зависит от характеристик окружающей среды, включая скорость микромобильности и плотность блокаторов.

Автор ВКР

(Подпись)

Голос Е.С.

(ФИО)

Оглавление

Список сокращений	3
Список обозначений.....	5
Введение.....	7
1. Особенности передачи данных в терагерцевом диапазоне частот.....	10
1.1. Методы энергоэффективности.....	10
1.2. Системная модель соты терагерцевого диапазона.....	14
1.3. Стратегии энергоэффективности.....	18
2. Математическая модель для анализа энергоэффективности передачи данных в терагерцевом диапазоне.....	21
2.1. Модель мультисвязности.....	21
2.2. Объединение технологии DRX и мультисвязности.....	25
2.3. Интересующие метрики	31
3. Численный анализ энергоэффективности передачи данных в терагерцевом диапазоне.....	32
Заключение	42
Список источников.....	44
Приложение 1. Сертификат участника конференции ИТТММ-2022.....	48
Приложение 2. Исходный код программной реализации численных расчетов влияния интенсивности блокаторов на долю времени простоя и энергопотребление.....	49

Список сокращений

Список русскоязычных сокращений

Обозначение	Расшифровка
БС	— Базовая станция
ПУ	— Пользовательское устройство
ТГц	— Терагерц

Список англоязычных сокращений

Обозначение	Расшифровка
3GPP	— Third Generation Partnership Project (Проект партнерства сетей связи третьего поколения)
5G	— Мобильная связь 5-го поколения
6G	— Мобильная связь 6-го поколения
BWP	— Bandwidth part (часть полосы пропускания)
DL	— Downlink (нисходящая линия связи)
DRX	— Discontinuous Reception (прерывистый прием)
eMBB	— enhanced Mobile BroadBand (расширенная мобильная широкополосная связь)
HPBW	— Half-Power Beamwidth (ширина луча на уровне половинной мощности)
IAB	— Integrated access and backhaul (интегрированный доступ и транзит)
LoS	— Line-of-Sight (прямая видимость)
LTE	— Long-Term Evolution (стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных для мобильных устройств)
mMTC	— massive Machine-Type Communication (массовая связь машинного типа)
NR	— New Radio (технология радиодоступа для сетей подвижной связи 5-го поколения)
PDCCCH	— Physical Downlink Control Channel (физический канал управления "вниз")
PPP	— Poisson Point Process (Точечный пуассоновский процесс)

QoS	— Quality of Service (Качество обслуживания)
RACH	— Random-access channel (Канал произвольного доступа)
RDM	— Random Direction Model (Модель случайного направления)
RRC	— Radio Resource Control (протокол управления радиоресурсами)
SINR	— Signal-to-Interference plus Noise Ratio (Отношение сигнал-шум)
SSB	— Synchronization signal block (Блок сигнала синхронизации)
UL	— Uplink (восходящая линия связи)
URLLC	— Ultra-Reliable Low Latency Communication (высоконадежное соединение с низкой задержкой передачи данных)

Список обозначений

Обозначение	Расшифровка
$G_{T,A}$	– Коэффициент усиления передающей антенны
$G_{T,U}$	– Коэффициент усиления принимающей антенны
h_A	– Высота ТГц БС
h_B	– Высота блокатора
h_U	– Высота ПУ
M_I	– Запас помехоустойчивости
N_0	– Шум
$N_T \times N_T$	– Число антенных элементов на ТГц БС
$N_U \times N_U$	– Число антенных элементов на ПУ
p_{T_i}	– Доля времени подключения к i -ой БС
$p_B(x)$	– Вероятность блокировки на расстоянии x
P_C	– Среднее энергопотребление
P_E	– Средняя энергоэффективность
p_N	– Вероятность одновременной блокировки LoS на всех N БС
p_O	– Вероятность отсутствия связи
P_T	– Мощность передающей антенны
r_B	– Радиус блокатора
T_A	– Период до смещения луча
T_B	– Продолжительность поиска луча
T_{DC}	– Доля времени простоя из-за сна
T_{DO}	– Доля времени простоя из-за отсутствия связи
T_L	– Продолжительность активной работы
T_{NL}	– Продолжительность блокировки БС
T_O	– Активный режим работы ПУ
T_S	– Режим ожидания ПУ
T_W	– Длительность простоя из-за сна ПУ в активном соединении
θ_{3db}^{\pm}	– Верхняя и нижняя точки с потерей мощности в 3дБ
θ_m	– Направление максимума мощности массива

Обозначение	Расшифровка
λ_A	– Плотность расположения ТГц БС
λ_B	– Плотность расположения блокаторов
λ_O	– Интенсивность переключения в активный режим
λ_S	– Интенсивность переключения в режим ожидания
$\Delta x, \Delta y$	– Средняя скорость смещения
$\Delta \phi, \Delta \theta$	– Средняя угловая скорость вращения
C	– Средняя мощность
$E[C_i]$	– Средняя пропускная способность ПУ при подключении к i -й БС
$E[B]$	– Среднее время поиска луча
$\text{erfc}(\cdot)$	– Дополнительная функция ошибок
N	– Число базовых станций
v	– Скорость блокатора
$x(t), y(t)$	– Случайное смещение по оси OX и OY
α	– Ширина луча
ζ	– Коэффициент затухания сигнала
$\mu(\cdot)$	– Параметр смещения
$\sigma(\cdot)$	– Параметр вращения
$\phi(t), \theta(t)$	– Случайное вращение относительно плоскостей

Введение

Системы новое радио (New Radio, NR) беспроводных сетей связи пятого поколения (5G), работающие как в микроволновом, так и в миллиметровом (mmWave) диапазонах частот, в настоящее время полностью стандартизированы и готовы к развертыванию по всему миру. Однако операторы все еще сдерживаются от глобального развертывания из-за ряда проблем, с которыми сталкиваются эти системы, особенно при их внедрении в диапазоне mmWave. Несмотря на это, ведущие страны и компании-разработчики уже объявили о планах по разработке технологий мобильной связи шестого поколения – 6G, действующей в терагерцевом диапазоне частот. В дополнение к требованиям чрезвычайно плотного развертывания, необходимого для достижения повсеместного покрытия, которые в настоящее время решаются в рамках 3GPP путем использования технологии интегрированного доступа и транзита (integrated access and backhaul, IAB), эти системы характеризуются низкой энергоэффективностью. Ожидается, что эта проблема будет решена в 3GPP Release 18 в контексте исследований 5G-Advanced, запланированных на 2022–2023 годы [1].

Важнейшей проблемой связи в mmWave и ТГц являются экстремальные потери в тракте и блокирование путей распространения малыми динамическими объектами, такими как человеческие тела, транспортные средства и т.д. Для устранения этого недостатка и повышения эффективности работы пользовательских устройств в этих системах, в дополнение к диаграмме направленности антенн, 3GPP предложила использовать функцию мультисвязности [2]. Согласно ей, пользовательское устройство (ПУ) может одновременно поддерживать связь с несколькими базовыми станциями (БС), расположенными поблизости, и переключаться между ними в случае потери активного соединения. Недавние исследования показали, что такой подход позволяет значительно улучшить производительность системы mmWave и ТГц в плане энергоэффективности и доли времени, которое ПУ проводит в условиях перебоев связи [3]-[5], а также параметры качества обслуживания пользователей (quality of service, QoS) в плане вероятности успешного завершения сессии и использования системных ресурсов [6], [7]. Однако, как известно, побочным эффектом мультисвязности является снижение энергоэффективности ПУ, поскольку затраты энергии на ПУ могут расти линейно с

увеличением числа одновременно поддерживаемых каналов [8], [9]. Таким образом, существует компромисс между пользовательской производительностью с одной стороны и энергоэффективностью с другой.

Для экономии энергии на ПУ стандарты 3GPP NR предлагают комплексный механизм прерывистого приёма (Discontinuous Reception, DRX) [10], значительно расширенный по сравнению с LTE для учета особенностей гибкой конструкции NR, включая формирование луча и рабочие циклы. Этот механизм представляет собой ряд усовершенствованных таймеров, которые должны быть соответствующим образом оптимизированы для повышения энергоэффективности ПУ [11]. С точки зрения мультисвязности набор параметров значительно расширяется, поскольку стандарты позволяют использовать различные настройки таймеров для активных и резервных каналов [12]. Несмотря на важность этой функциональности, анализ производительности схем DRX в основном ограничивался оценкой производительности на уровне каналов. Исследования, иллюстрирующие компромиссы между производительностью пользователя и энергоэффективностью в условиях мультисвязности 3GPP при динамических блокировках и перебоях микромобильности, еще не проводились.

В данной работе предлагается аналитическая модель для характеристики компромиссов между энергоэффективностью и пользовательской производительностью при наличии мультисвязности в условиях динамического блокирования и микромобильности. Для этого используются инструменты стохастической геометрии и теории цепей Маркова, чтобы определить ключевые показатели эффективности, такие как доля времени простоя, вызванное DRX, поиском луча и блокировкой, энергопотребление, а также энергоэффективность.

Целью выпускной работы магистра является разработка математической модели, позволяющей оценить характеристики пользовательского устройства, а именно, потребление энергии, энергоэффективность и долю времени простоя в режиме прерывистого приема DRX с учетом мультисвязности и микромобильности для систем связи 6-го поколения.

Научная новизна работы состоит в том, что в ходе исследования была предложена математическая модель, позволяющая оценить показатели эффективности пользовательского устройства в зависимости от различных внешних

параметров: интенсивности блокаторов, микромобильности и степени мультисвязности.

Практическая значимость выпускной квалификационной работы магистра заключается в возможности использования результатов исследования для решения практических задач, а именно снижения потребления энергии пользовательских устройств при условии выполнения QoS.

Выпускная квалификационная работа магистра выполнена следующим образом. В первой части работы представлена справочная информация и связанные с ней публикации по мультисвязности, микромобильности и энергоэффективности, а также рассмотрена системная модель. Во второй части рассмотрена исследуемая в работе модель мультисвязности, математическая модель и интересующие показатели эффективности. В третьей части работы показаны численные оценки показателей энергоэффективности и энергопотребления системы в зависимости от различных параметров. Также показаны выводы из полученных результатов.

По результатам работы сделан доклад на XII Всероссийской конференции (с международным участием) "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем (ИТТММ-2022)" (Приложение 1), тезисы которых опубликованы в трудах конференции. Также была подана заявка на регистрацию программы для ЭВМ для расчета энергопотребления устройства в режиме DRX для различных типов трафика.

1. Особенности передачи данных в терагерцевом диапазоне частот

1.1. Методы энергоэффективности

Энергоэффективность является одним из ключевых показателей эффективности в сетях нового радио (NR) 5G, предназначенных для поддержки различных вариантов использования, включая расширенную мобильную широкополосную связь (enhanced mobile broadband, eMBB), массовую связь машинного типа (massive machine-type communications, mMTC) и сверхнадежную связь с низкой задержкой (ultra-reliable and low latency communications, URLLC). Энергоэффективность важна как для ПУ, так и для БС. В данной работе я уделю особое внимание ПУ. Технология 5G NR определяет несколько методов экономии энергии, таких как адаптация полосы пропускания [13], использование управления радиоресурсами (radio resource control, RRC), кросс-слотовое планирование [14], механизм прерывистого приема (DRX) [11], [15], [16] и другие. Известно, что из всех этих вариантов DRX в основном влияет на энергетические характеристики ПУ. Этот механизм не нов и уже был предложен для систем 4G LTE [17]. Однако с появлением в 5G NR расширенных функциональных возможностей, таких как гибкая нумерология, формирование луча, мультисвязность, эти механизмы были соответствующим образом расширены.

Основная идея DRX заключается в том, чтобы позволить ПУ отключать свои радиоприемники, тем самым снижая энергопотребление. Механизм DRX, введенный для NR, имеет ряд параметров: короткий цикл сна, длинный цикл сна, таймер бездействия DRX, таймер короткого цикла DRX и период длинного цикла DRX. Короткий и длинный циклы сна имеют различные интервалы продолжительности сна с фиксированными периодами.

В DRX также определены три режима: RRC-Connected, RRC-Inactive и RRC-Idle. Каждый цикл либо в режиме RRC-Connected, либо в режиме RRC-Inactive начинается с периода «On Duration», в течение которого ПУ прослушивает радиоканал и получает данные от БС, чтобы узнать, есть ли у БС данные для передачи этому ПУ. Если БС не сообщила данные для передачи, то ПУ выключает свое радио и переходит в «спящий режим» до конца цикла, продолжительность которого определяется коротким циклом DRX. В коротком цикле сна ПУ

переключается между активным состоянием и состоянием сна, чтобы потенциально уменьшить задержку для процедуры «пробуждения».

В дополнение к короткому циклу DRX может быть задан длинный цикл DRX. Использование длинных циклов DRX дополнительно снижает энергопотребление ПУ, но также увеличивает задержку передачи данных. ПУ переключается на длинный цикл DRX, если в течение заданного количества коротких циклов DRX нет передач от БС. Аналогично, после нескольких длинных циклов DRX ПУ переключается в режим RRC-Inactive. Следует отметить, что режим RRC-Inactive основан на тех же методах, что и режим RRC-Connected. Основное различие заключается в продолжительности короткого и длительного сна. Согласно 3GPP, длительный сон длится от 6 до 20 мс, а короткий - не более 6 мс.

Когда соединение с БС потеряно, ПУ переходит в режим RRC-Idle из режимов RRC-Connected и RRC-Inactive. После чего ПУ периодически просыпается и отслеживает PDCCH (Physical Downlink Control Channel, физический канал управления "вниз") и PDSCH (Physical Downlink Shared Channel, физический канал для передачи информации "вниз" с разделением пользователей) для получения пейджинговых сообщений. Как отмечалось выше, использование механизма DRX не только снижает энергопотребление БС, но и увеличивает задержку при передаче данных. Соответственно, при параметризации этого режима необходимо учитывать требования QoS. Значения энергопотребления приведены в таблице 1.1 [12], [15], [18].

Таблица 1.1 Потребляемая энергия ПУ

Обозначение	Состояние	Значения энергопотребления
e_{SSB}	Обнаружение SSB	100 МВт
e_{RACH}	Процедура RACH	376,5 МВт
e_{IDLE}	Состояние RRC-Idle	0 МВт
e_i	Активное состояние	350 МВт
e_{ON-x}	«On Duration»	61 МВт
e_{CSS}	Короткий сон C-DRX	45 МВт
e_{CLS}	Длительный сон C-DRX	20 МВт
e_{ISS}	Короткий сон I-DRX	20 МВт

e_{ILS}	Длительный сон I-DRX	1 МВт
-----------	----------------------	-------

Энергоэффективность уже достаточно хорошо изучена в контексте систем 4G LTE. Например, в [19] авторы предложили алгоритм компромисса между спектральной эффективностью и энергоэффективностью для экономии энергии в нисходящих сетях LTE. Исследование показало, что предложенный алгоритм продлевает срок службы батареи за счет регулировки начального и конечного состояний БС для минимизации средней задержки и энергопотребления. В [20] авторы обратили внимание на механизм DRX. Была построена аналитическая модель с использованием Марковского процесса, которая показала влияние механизма DRX на коэффициент экономии энергии. Исследование показало, что механизм DRX переводит ПУ в спящий режим [15] при отсутствии пакетной активности в течение длительного периода времени, что положительно влияет на энергосбережение. Также в [15] была разработана модель энергопотребления, реализованная в численном симуляторе для одного пользователя, связанная с управлением радиоресурсами в подключенном режиме RRC. Было установлено, что использование короткого спящего режима DRX может снизить энергопотребление на 26% и уменьшить задержку на 74% по сравнению с базовым вариантом длинного DRX.

Постепенно исследователи начали изучать вопросы энергоэффективности для сетей 5G NR. Важно отметить, что способы повышения энергоэффективности также изменились. Например, появилось новое состояние RRC-Inactive. Этот вариант был подробно исследован в [21]. Было продемонстрировано, что использование состояния RRC-Inactive обладает необходимым уровнем гибкости и конфигурируемости ПУ для удовлетворения требований различных сценариев использования 5G и позволяет достичь 8-кратного улучшения задержки, 5-кратного улучшения энергоэффективности по сравнению с использованием состояния RRC-Idle систем 4G LTE.

Также в [11] и [22] авторы использовали механизм DRX, который снижает барьеры при поиске луча и отслеживании только часть доступных каналов. В [22] была предложена полумарковская цепь с 8 состояниями, отражающая несколько рабочих режимов. Были получены аналитические выражения, показывающие, что

даже неоптимальная политика отслеживания каналов может обеспечить значительную экономию энергии при относительно небольшом снижении производительности и пропускной способности. Авторы работы [11] используют моделирование для отслеживания экономии энергии при относительно небольшом ухудшении показателей прерываний и пропускной способности. Энергоэффективность также рассматривается в [23], где авторы смоделировали энергопотребление ПУ с помощью полумарковского процесса. Они сформулировали и решили задачу оптимизации с ограничением по задержке, чтобы максимизировать энергоэффективность устройства при заданных требованиях к задержке. Представленные численные результаты показали, что предложенный подход позволяет снизить энергопотребление на 40% по сравнению со схемой DRX с параметрами по умолчанию.

Следует также отметить, что появились исследования мультисвязности, поскольку она позволяет повысить надежность сети и улучшить пропускную способность системы [3], [24], [25]. Например, авторы работы [26] исследовали мультисвязность с точки зрения энергоэффективности сети, основываясь на основных формулах энергоэффективности, без привлечения таких механизмов, как RRC или DRX. Для проверки численных результатов была разработана имитационная модель. Были исследованы такие показатели, как емкость ячейки БС, ее надежность и условия энергоэффективности. Следует добавить, что в данной работе энергоэффективность измеряется не на пользовательском оборудовании, а на базовой станции. И с точки зрения исследования энергоэффективности на пользовательском устройстве можно выделить только работу с двойным подключением. В [12] авторы исследовали именно такой сценарий, поскольку двойное подключение увеличивает пропускную способность и устойчивость к мобильности. Было обнаружено, что обычный механизм DRX не подходит для этой схемы, поэтому авторы смоделировали синхронизированную адаптивную спящую схему DRX с использованием полумарковской модели. Моделирование также было использовано для доказательства того, что предложенная схема DRX работает более эффективно, чем традиционная. Согласно полученным результатам, потребление энергии зависит от таймера бездействия, в то время как задержка остается

неизменной. Стоит отметить, что в данной работе две БС передают различные потоки данных.

В этой работе будут исследоваться такие характеристики как период простоя, энергопотребление и энергоэффективность. Особое внимание уделено микромобильности, ведь при частом переключении между базовыми станциями затрачивается большой объем энергии на поиск луча. Более того, между БС и ПУ будет передаваться один поток данных, переключаясь между базовыми станциями при возобновлении разного рода препятствий для повышения надежности связи. Также в этой работе будет представлена комбинация механизмов энергосбережения DRX, RRC и мультисвязность для N базовых станций.

1.2. Системная модель соты терагерцевого диапазона

В этой части будет представлена модель исследуемой системы. Начнем со специфики радиочасти, включая модели развертывания, распространения, блокирования и микромобильности. Затем уточним специфику работы системы, включая алгоритмы поиска луча, схему DRX и работу мультисвязности. Наконец, формализуем рассмотренные схемы масштабирования DRX и определим интересующие метрики.

Развертывание, блокирование и мобильность

Предполагаем, что геометрическое расположение ТГц БС соответствует точечному Пуассоновскому процессу в \mathbb{R}^2 с плотностью λ_A . Высота БС постоянна и равна h_A . Рассматривается одно ПУ в случайно выбранной точке. Высота ПУ постоянна и равна h_U , как показано на Рис. 1.1.

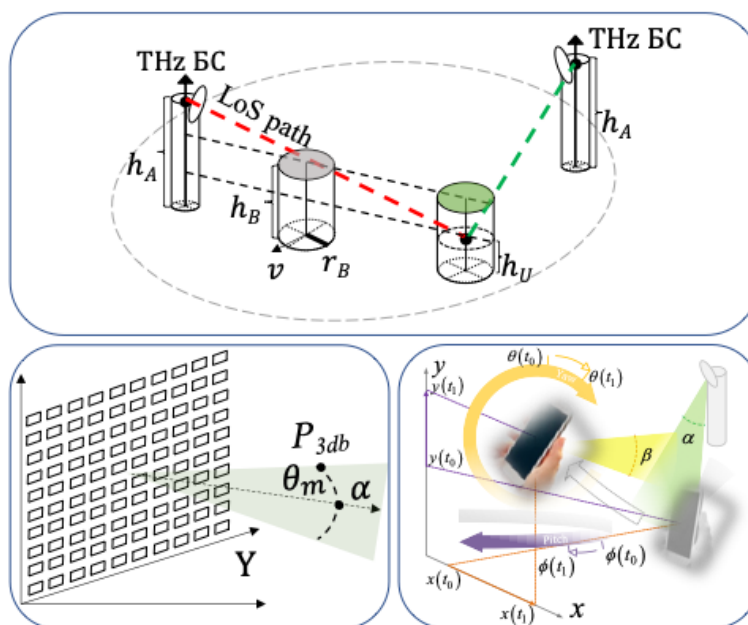


Рис.1.1 Системная модель

Предполагаем, что рассматриваемое ПУ остается неподвижным. Чтобы отразить динамическое блокирование людьми, мы представляем людей цилиндрами с высотой h_B , соответствующей среднему росту человека, и радиусом r_B , причем $h_B > h_U$. Предполагается, что люди движутся в соответствии с моделью случайного направления (random direction mobility, RDM, [27]). Согласно этому, пользователь сначала случайным образом определяет направление движения равномерно в $(0, 2\pi)$, а затем движется в выбранном направлении с постоянной скоростью v м/с в течение экспоненциально распределенного времени с параметром μ .

Модель распространения сигнала

В работе используем модель "улица-каньон" Urban-Micro (UMi) для представления потерь при распространении. Согласно [28] модель определяется следующим образом

$$L_{dB} = 32,4 + \zeta 10 \log(y) + 20 \log f_c \quad (1.1)$$

где f_c - несущая частота, измеряемая в ГГц, y - расстояние, измеряемое в метрах, ζ - коэффициент, определяющий условия прямой видимости (LoS) и отсутствия LoS. В данной работе мы предполагаем, что условия прямой видимости (LoS) являются беспрепятственными, что означает, что $\zeta = 2,1$ [28]. Отметим, что модель также может быть применена к случаю без LoS, где $\zeta = 3,19$.

Преобразуя потери пути в линейном масштабе с помощью $Ay^{-\zeta}$, где $A = 10^{2 \log_{10} f_c + 3,24}$ - константа, зависящая от частоты отношения сигнал-шум (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR), принимает следующий вид

$$S(y) = P_T G_{T,A} G_{T,U} \left[\frac{y^{-\zeta}}{N_0 + M_I} \right] \quad (1.2)$$

P_T – мощность передатчика, $G_{T,A}$ и $G_{T,U}$ – усиление сигнала на антеннах БС и ПУ, N_0 – шум, M_I – запас помехоустойчивости. Отметим, что последний параметр зависит от плотности размещения ТГц БС, λ_A и может быть определен с помощью моделей, предложенных в [29], [30].

Микромобильность

В дополнение к блокировке, предполагается, что связь между ПУ и БС подвержена нарушениям, связанным с микромобильностью [31]-[33]. Под микромобильностью подразумеваются быстрые повороты и встряхивания ПУ в руках пользователя. Это явление приводит к регулярной потере связи, даже когда ПУ находится в хороших условиях распространения. Для моделирования микромобильности мы используем модель из [34]. Модель полностью параметризована декартовой и угловой скоростями и обеспечивает функцию плотности вероятности (probability density function, pdf) времени до отключения, $f_{T_A}(t)$, как показано в (1.4). В дальнейшем мы берем среднее время до отключения, рассчитанное с помощью (1.4), и используем экспоненциальное распределение для времени до отключения:

$$f_{\tilde{T}_A}(t) = \lambda_{T_A} e^{-\lambda_{T_A} t}, \quad \lambda_{T_A} = \left[\int_0^{\infty} t f_{T_A}(t) dt \right]^{-1} \quad (1.3)$$

$$f_{T_A}(t) = \frac{\frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}}}{\sigma_x} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_y - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right]}{2\sqrt{2\pi}t \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta} \right) \right]^{-1}} + \frac{\frac{e^{-\frac{(\log(t)-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}}{\sigma_y} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_x - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) \right]}{2\sqrt{2\pi}t \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\phi - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\phi} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_\theta - \log(t)}{\sqrt{2}\sigma_\theta} \right) \right]^{-1}} + \quad (1.4)$$

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

где $\operatorname{erfc}(\cdot)$ – дополнительная функция ошибок, $\mu(\cdot)$ и $\sigma(\cdot)$ – параметры соответствующих компонент смещения и вращения, которые можно оценить на основе эмпирических данных.

Модели антенной решетки и поиска луча

Как на ПУ, так и на БС предполагаются прямоугольные антенные решетки. Для моделирования диаграммы направленности излучения, аналогично [30], [35], мы используем конусные модели с постоянным коэффициентом усиления в главном лепестке. Следуя [36], ширина луча по уровню половинной мощности (half-power beamwidth, HPBW) главного лепестка аппроксимируется $\alpha = 2|\theta_m - \theta_{3db}^\pm|$, где α – ширина луча, θ_m – направление максимума мощности массива, а θ_{3db}^\pm – верхняя и нижняя точки с потерей мощности в 3дБ. Параметр рассчитывается как $\theta_m = \arccos(-1/\pi)$, а $\theta_{3db}^\pm = \arccos(\pm 2,782/N_{(\cdot)}\pi)$.

Средний коэффициент усиления по главному лепестку равен [36]:

$$G = \frac{1}{\theta_{3db}^+ - \theta_{3db}^-} \int_{\theta_{3db}^-}^{\theta_{3db}^+} \frac{\sin(N_{(\cdot)}\pi \cos(\theta)/2)}{\sin(\pi \cos(\theta)/2)} d\theta \quad (1.5)$$

где $N_{(\cdot)}$ – количество строк или столбцов.

Мы учитываем задержки, вызванные процедурой поиска пучка. Мы предполагаем процедуру всестороннего поиска. Согласно ей, одна сторона канала связи переводится во всенаправленный режим, а другая переключается между

конфигурациями в поисках наилучшей. Затем роли меняются местами. Временная сложность этой процедуры составляет $T_B = N_U N_T \delta$, где δ - время переключения антенной решетки, N_U и N_T - количество конфигураций антенн БС и ПУ. Отметим, что разработанная далее модель может включать другие процедуры поиска луча, например, иерархический поиск луча.

Модели мультисвязности и поиска луча

Чтобы избежать перебоев, вызванных блокировкой или микромобильностью, мы предполагаем, что ПУ реализует функцию мультисвязности, представленную 3GPP [2]. В соответствии с ней ПУ может поддерживать связь с N ближайшими БС ТГц диапазона. Выбор БС для связи осуществляется на основе SINR. Одновременно используется только один канал. Как только активный канал теряется в результате сбоя или микромобильности, ПУ переключается на резервный канал с наивысшим SINR. Когда все N активных каналов недоступны, ПУ находится в состоянии блокировки.

В данной работе рассмотрена модель трафика 3GPP FTP Model 3, которая типична для потоковых сервисов, таких как игры и обмен видео. Эта модель представляет собой источник трафика в режиме включения/выключения, где интервал включения (или работы) инициируется поступлением X объема трафика, который должен быть передан в течение экспоненциально распределенного интервала с параметром λ_o . После передачи начинается период выключения (или ожидания) Y , который также экспоненциально распределен с параметром λ_s . Кроме того, для некоторых параметров, представляющих интерес в данной работе, будет использована модель полного буфера [37].

1.3. Стратегии энергоэффективности

После загрузки приложения ПУ обычно переходит в состояние RRC-Connected и начинает сканирование выделенного диапазона частот, пытаясь установить соединение с соответствующей БС. Поскольку в работе рассматривается мультисвязность, мы предполагаем, что ПУ способно сканировать диапазон частот, который достаточно широк, чтобы соответствовать степени мультисвязности. Во время сканирования частоты ПУ обнаруживает несколько блоков сигналов синхронизации (synchronization signal blocks, SSBs) в пределах половины кадра, и для каждой передаваемой БС определяет луч, который обеспечивает наилучший

SINR. Операция сканирования частоты занимает e_{SSB} МВт на слот. Затем, после синхронизации с N БС выполняется процедура RACH (random-access channel, канал произвольного доступа) для установления соединения с ними, что требует Ne_{RACH} МВт. Данная процедура подробно показана на Рис. 1.2.

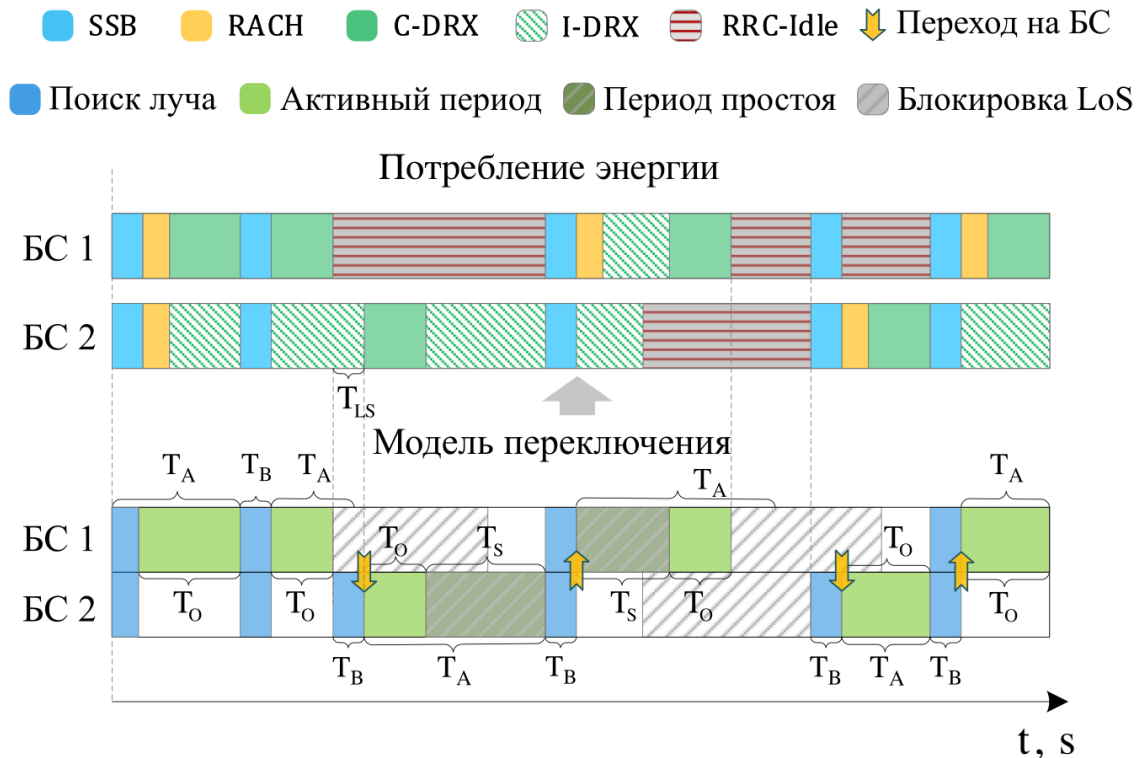


Рис 1.2. Модель энергопотребления

После завершения соединения ПУ подключается к БС, имеющей наилучший SINR. Мы предполагаем, что ПУ может работать в двух режимах, которые соответствуют состояниям RRC: активном (RRC-Connected) и неактивном (RRC-Inactive). В активном режиме ПУ получает данные от активной в данный момент БС. Мы также предполагаем, что в каждом слоте применяется схема планирования одного и того же слота и, таким образом, ПУ тратит свою энергию на мониторинг PDCCH и PDSCH. Когда ПУ переходит в неактивный режим, он может применить механизм I-DRX для снижения энергопотребления. Между тем, для поддержки соединений с вторичными БС ПУ поддерживает их в том же неактивном состоянии.

Активное соединение может быть прервано при падении SINR ниже минимального уровня для набора схем модуляции и кодирования ТГц (modulation and coding schemes, MCS) в результате либо блокировки, либо микромобильности [38]. В первом случае мы предполагаем, что ПУ отключается от текущей БС и переходит в состояние RRC-Idle, пока не попытается снова установить связь с этой

БС. Мы считаем, что энергопотребление ПУ в этом состоянии пренебрежимо мало. Однако, при повторной связи с этой БС в будущем, ПУ должно пройти процедуру RACH и потратить e_{RACH} МВт. Используя мультисвязность, ПУ может переключиться на вторичную БС за счет простого перевода соединения из неактивного состояния в активное.

Другим эффектом, вызывающим прерывания, является микромобильность. Для восстановления направленности лучей ПУ должно обнаруживать SSB во всех частотных диапазонах ранее переданных N БС. С точки зрения энергопотребления это означает, что ПУ тратит столько же энергии e_{SSB} МВт, сколько и при начальной операции сканирования частот. В результате оно всегда выбирает конфигурацию антенны с наилучшим SINR, что может потребовать переключения на другую БС.

Чтобы охарактеризовать компромисс между энергопотреблением и производительностью ПУ, мы рассматриваем несколько метрик, представляющих интерес: энергопотребление, доля времени простоя и энергоэффективность. Характеризуя время отсутствия связи, мы будем различать время отсутствия связи, учитывая события, когда все БС заблокированы или ПУ выполнило поиск луча, а также время, когда трафик должен быть передан, но ПУ находится в фазе сна.

2. Математическая модель для анализа энергоэффективности передачи данных в терагерцевом диапазоне

В данной главе будет описана исследуемая система оценки производительности. Сперва определим модель мультисвязности без влияния схемы DRX, что позволит получить показатели эффективности и потерь, а затем дополним ее механизмом DRX. В результате определим метрики, необходимые для проведения исследования.

2.1. Модель мультисвязности

Сформулируем модель мультисвязности, подобную рассмотренной в [25], где учитывается как блокировка, так и микромобильность. Модель основана на поглощающей цепи Маркова с $3N + 1$ состоянием, как показано на рис. 2.1

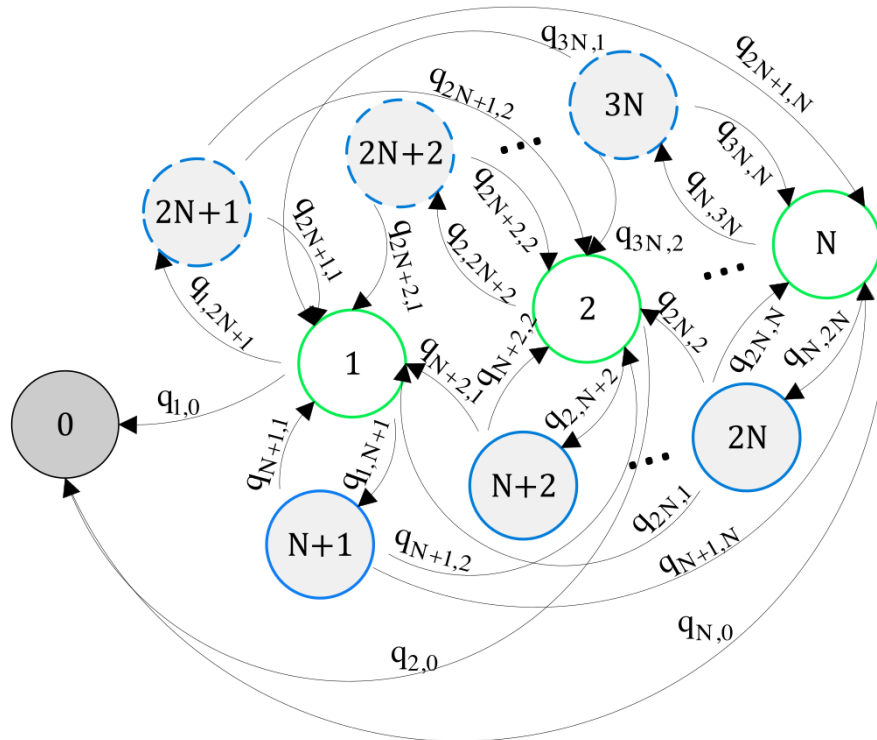


Рис.2.1. Поглощающая цепь Маркова в условиях мультисвязности

Пространство состояний собрано из четырех непересекающихся множеств:

- состояния $i = 1, \dots, N$, описывают непрерывную связь с БС;
- состояния $N + j, j = 1, \dots, N$, означают условия блокировки LoS с j -ой БС
- состояния $2N + j, j = 1, \dots, N$, соответствуют процедуре поиска луча, вызванной микромобильностью при соединении с j -ой БС;

- состояние 0 означает одновременную блокировку путей LoS со всеми N БС.

Следует отметить, что поглощающая цепь Маркова характеризуется начальным вектором $\vec{\pi}$ и матрицей вероятностей перехода $Q = [q_{ij}]$, $i, j = 0, \dots, 3N$.

Рассматриваемая модель представляет собой период связи, когда хотя бы одна БС доступна для активной связи. Это дает нам представление о продолжительности этого периода, T_L , среднем количестве повторных подключений ПУ, σ_i , $i = 1, \dots, N$, блокировок LoS, σ_i , $i = N + 1, \dots, 2N$ и смещений луча, σ_i , $i = 2N + 1, \dots, 3N$. Однако анализ схемы энергосбережения требует детального рассмотрения непрерывной связи с БС, что делает эту модель слишком сложной. Чтобы восполнить этот пробел, период непрерывного соединения будет представлен в виде отдельной цепи Маркова, обеспечивая детальный взгляд на макро состояния $i=1, \dots, N$.

По принципу мультисвязности ПУ сначала выбирает ближайшую БС. Устройство переключается на другую БС всякий раз, когда входит в состояние отключения с текущей. Отключение может быть вызвано как микромобильностью, так и блокировкой LoS человеческими телами. В моменты начала сессии и повторного соединения выбирается ближайшая незаблокированная БС из N ближайших. Теперь перейдем к численному обоснованию исследуемой модели.

Вероятность блокировки базовой станции определяется как

$$p_{N,i} = 1 - \int_0^{\infty} f_i(x) p_{B,i}(x) dx, \quad (2.1)$$

где $f_i(x)$ - расстояние до i -ой БС в PPP [39], то есть,

$$f_i(x) = \frac{2(\pi\lambda_A)^i}{(i-1)!} x^{2i-1} e^{-\pi\lambda_A x^2}, \quad (2.2)$$

а $p_{B,i}(x)$ - вероятность блокировки [40].

$$p_{B,i}(x) = 1 - e^{-2x r_B \lambda_B \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U}}. \quad (2.3)$$

Предполагая, что блокировки LoS на БС независимы друг от друга, вероятность p_N того, что все N выбранных БС одновременно заблокированы, определяется как

$$p_N = \prod_{i=1}^N p_{N,i} \quad (2.4)$$

и совпадает с вероятностью отключения, т.е. долей времени, когда передача данных невозможна, $p_0 = p_N$.

Поскольку в данной работе внимание акцентируется на периоде активной связи, вектор начального состояния для рассматриваемой цепи Маркова может быть записан как $\vec{\pi}$, где $\pi_i = p_{T_i}(1 - p_N)^{-1}$ при $i = 1, \dots, N$, и $\pi_i = 0$, при $i = 0, N + 1, \dots, 3N$, где p_{T_i} - доля времени, в течение которого ПУ связано с БС [25]. Аналогично, следуя [25], вероятности переходов состояний для цепи могут быть определены как

$$\begin{aligned}
q_{i,N+i} &= (1 - p_N) \int_0^\infty \int_y^\infty f_{T_{L,i}}(y) f_{T_A}(x) dx dy, i = 1, \dots, N, \\
q_{i,2N+i} &= (1 - p_N) \int_0^\infty \int_y^\infty f_{T_A}(y) f_{T_{L,i}}(x) dx dy, i = 1, \dots, N, \\
q_{N+i,i} &= \prod_{k=1}^{i-1} p_{N,k}, i = 1, \dots, N, \\
q_{N+i,j} &= (1 - p_{N,j}) \prod_{k=1, k \neq i}^{j-1} p_{N,k}, i, j = 1, \dots, N, i \neq j, \\
q_{2N+i,i} &= \prod_{k=1}^{i-1} p_{N,k}, i = 1, \dots, N, \\
q_{2N+i,j} &= (1 - p_{N,j}) \prod_{k=1, k \neq i}^{j-1} p_{N,k}, i, j = 1, \dots, N, i \neq j, \\
q_{i,0} &= p_N, i = 1, \dots, N, \\
q_{0,0} &= 1, \\
q_{i,j} &= 0, \text{ в остальных случаях}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

где $q_{i,j}$ - элементы матрицы $Q = [q_{ij}]$, $i, j = 0, \dots, 3N$, составляющей фундаментальную матрицу $D = (I - U)^{-1}$ [41] с $U = [u_{ij}] = [q_{ij}]$, $i, j = 1, \dots, 3N$, и описывающей процесс до выхода из множества переходных состояний.

Фундаментальная матрица позволяет определить, сколько раз j -ая БС используется для активной связи до наступления блокировки:

$$v_j = \sum_{i=1}^N \pi_i d_{ij}, j = 1, \dots, N \tag{2.6}$$

Данная модель также дает возможность рассчитать спектральную эффективность в следующем виде

$$E[C] = \frac{E[T_L]}{E[T_{NL}] + E[T_L]} E[C_{T_L}] \quad (2.7)$$

где $E[T_{NL}]$ - среднее время в условиях отсутствия связи из-за блокировки LoS, которое может быть найдено как

$$E[T_{NL}] = T_B + \sum_{i=1}^N p_{T_i} \int_0^{\infty} t f_{T_{NL,i}}(t) dt \quad (2.8)$$

В (2.8), $f_{T_{NL,i}}(t)$ - pdf периода блокировки LoS, T_B - продолжительность поиска луча.

$E[T_L]$ - средняя продолжительность интервала связи, которая может быть найдена как:

$$E[T_L] = E[B] + \sum_{i=1}^N \sigma_i T_{L,i}, \quad (2.9)$$

где $T_{L,i}$ - средняя продолжительность непрерывной связи с БС, которая может быть найдена как минимум двух случайных величин (random variables, RV) в виде

$$T_{L,i} = \int_0^{\infty} t (f_{T_{L,i}}(t)[1 - F_{T_A}(t)] + f_{T_A}(t)[1 - F_{T_{L,i}}(t)]) dt. \quad (2.10)$$

Среднее число переходов из состояния i до поглощения задается соответствующими элементами вектора $\vec{\sigma}$ со следующими компонентами

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^{3N} \pi_j d_{ji}, i = 1, \dots, 3N, \quad (2.11)$$

Спектральная эффективность во время интервала продолжительности связи задается следующим образом

$$E[C_{T_L}] = \frac{1}{E[T_L]} \sum_{i=1}^N \sigma_i T_{L,i} E[C_i] \quad (2.12)$$

где спектральная эффективность ПУ, когда оно связано с БС, определяется следующим образом

$$E[C_i] = \int_0^{\infty} \log_2(1 + S(x)) f_i(x) dx \quad (2.13)$$

2.2. Объединение технологии DRX и мультисвязности

Переход из одного состояния в другое в рассматриваемой модели системы с функцией DRX может быть смоделирован как поглощающая цепь Маркова, показанная на рис. 2.2. В нашей задаче цепь состоит из девяти переходных и одного поглощающего состояния.

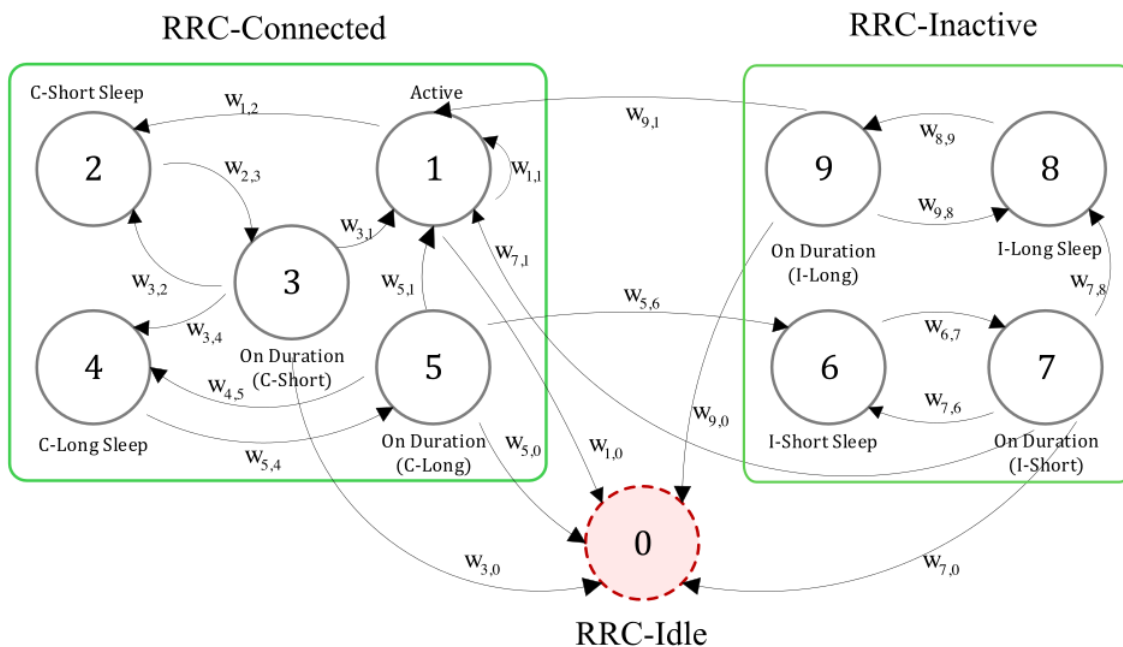


Рис. 2.2. Поглощающая цепь Маркова в состояниях RRC + DRX

Группа состояний от 1 до 5 соответствует режиму RRC-Connected. Состояние 1 представляет собой загрузку данных с получением блоков PDCCH и PDSCH. По истечении таймера бездействия t_I ПУ может либо продолжить прием данных (т.е. вернуться в то же состояние), либо, если нет данных для загрузки, перейти в режим короткого сна C-DRX. В то же время может произойти блокировка LoS в результате перехода в режим RRC-Idle, который представлен поглощающим состоянием (состояние 0). Как только ПУ переходит в состоянии короткого сна C-DRX (состояние 2), единственным вариантом является последующий период C-DRX «On Duration» (состояние 3). В состоянии «On Duration» ПУ определяет, есть ли пакеты для загрузки. Таким образом, оно может перейти в активное состояние (состояние 1) для загрузки данных или вернуться в состояние короткого сна C-DRX (состояние 2), если нет данных для загрузки. Если короткий сон C-DRX повторяется n_{CSS} раз и нет переданных данных, ПУ переключается на длинный цикл C-DRX, состоящий из длительного сна (состояние 4) и последовательных периодов «On Duration» (состояние 5).

Аналогично, если после n_{CLS} последовательных итераций пакетов все еще не поступает, ПУ переходит в режим RRC-Inactive, что показано состояниями 6-9 на рис. 2.1. Эта группа состояний работает по тем же принципам, что и состояния 2-5, за исключением значений n_{ISS} и n_{ILS} , используемых для короткого и длинного циклов сна. Значение n_{ILS} принимается бесконечным, так как ПУ не входит в другие циклы DRX до перехода в активное состояние. Также следует отметить, что во всех состояниях «On Duration», т.е. в состояниях 3, 5, 7 и 9, ПУ может также обнаружить пакеты, готовые к передаче, и перейти в активное состояние (состояние 1), или может испытать перебои в связи и, таким образом, перейти в режим RRC-Idle (состояние 0).

Как было указано ранее, среднее число посещений переходного состояния поглощающей цепи Маркова определяется элементами фундаментальной матрицы $D = (I - U)^{-1}$ [41], [42], где $U = [u_{ij}] = [w_{ij}]$, $i, j = 0 \dots, 9$ - подматрица, описывающая процесс до выхода из множества переходных состояний. Запись (i, j) -й матрицы D — это ожидаемое число раз, когда цепь находится в состоянии j , учитывая, что цепь началась в состоянии i . Используя фундаментальную матрицу, среднее число переходов через состояние i до поглощения определяется соответствующими элементами вектора $\vec{\tau}$, определенного как

$$\tau_i = \sum_{j=1}^9 \pi_j d_{ji}, i = 1, \dots, 9 \quad (2.14)$$

Обозначим pdf времени непрерывной связи с БС как $f_{C,i}(t)$, $i = 1, \dots, N$. Поскольку соединение может быть прервано либо микромобильностью, либо блокировкой LoS, длина непрерывного соединения может быть найдена как минимум между pdf этих двух RV:

$$f_{C,i}(t) = f_{T_{L,i}}(t)[1 - F_{\tilde{T}_A}(t)] + f_{\tilde{T}_A}(t)[1 - F_{T_{L,i}}(t)] \quad (2.15)$$

где $F_{\tilde{T}_A}(t)$ - кумулятивная функция распределения (cumulative distribution function, CDF) времени до отключения из-за микромобильности, полученная аналогично (1.3) $F_{\tilde{T}_A}(t) = 1 - e^{-\lambda_{T_A} t}$.

Важное уточнение, поскольку и время до микромобильности, и время до блокировки LoS распределены экспоненциально, минимум этих распределений все равно экспоненциальный и, таким образом, обладает свойством отсутствия

последствия. Имея в виду это свойство, выведем вероятности перехода для предложенной цепи Маркова. Начнем с перехода из состояния 1 в само состояние. Обозначим распределение длительности режима работы и режима ожидания ПУ, соответственно, $f_o(x) = \lambda_o e^{-\lambda_o x}$ и $f_s(x) = \lambda_s e^{-\lambda_s x}$. Стоит отметить, что переход в себя возможен только в течение таймера бездействия, если не происходит ни потери соединения, ни перехода в режим ожидания, что приводит к следующим результатам:

$$w_{1,1} = \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_o(x) dx \cdot \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{c,i}(y) dy \quad (2.16)$$

Переход в состояние 2, соответствующее короткому сну в режиме RRC-Connected, происходит в том случае, когда ПУ переходит в режим ожидания в течение таймера бездействия. Однако он обусловлен отсутствием потери соединения, т.е.,

$$w_{1,2} = \int_0^{t_I+t_{on}} f_o(x) dx \cdot \int_{t_I+t_{on}}^{\infty} f_{c,i}(y) dy \quad (2.17)$$

Переход из состояния 1 в состояние поглощения, состояние 0, связан с потерей соединения во время таймера бездействия. Вероятность может быть найдена как:

$$w_{1,0} = \int_0^{t_I+t_{on}} f_{c,i}(x) dx \quad (2.18)$$

Единственным возможным переходом из состояния 2 в режим короткого сна является C-DRX «On Duration», что соответствует состоянию 3. Таким образом:

$$w_{2,3} = 1 \quad (2.19)$$

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

$$w_{3,1} = \int_0^{t_{CSS}} f_s(x) dx \cdot \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_{c,i}(y) dy. \quad (2.20)$$

В то же время, если ПУ остается в режиме ожидания, оно переходит в режим сна. Если количество последовательных циклов сна не превышает n_{CSS} , то ПУ

возвращается в режим короткого сна, состояние 2, в противном случае схема DRX переводит ПУ в длительный сон, состояние 4, который определен как (2.24).

Для определения вероятности перехода в режим длительного сна C-DRX n_{CLS} , рассмотрим дополнительную «развернутую» поглощающую цепь, состоящую из $3+2n_{CSS}$ состояний и представляющую собой короткие циклы C-DRX, как показано на рисунке 2.3.

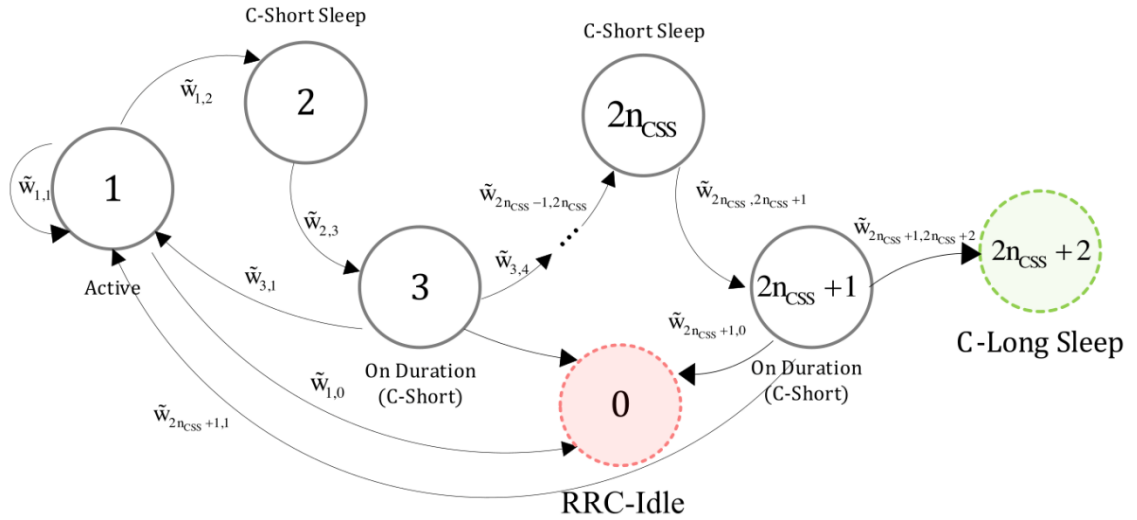


Рис. 2.3. Поглощающая цепь Маркова для коротких циклов DRX

В этой цепи состояния 0-3 такие же, как и в основной схеме DRX, а следующие $2n_{CSS}$ состояния представляют собой повторяющиеся переходы между состоянием 2 и 3 в основной схеме на рисунке 2.2. Крайние $2+2n_{CSS}$ состояния являются еще одним поглощающим состоянием, соответствующим длительному сну C-DRX. Таким образом, мы получаем матрицу переходов $\tilde{W} = [\tilde{w}_{ij}]$, $i, j = 0, \dots, 2 + 2n_{CSS}$ следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \tilde{w}_{ij} &= w_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3 \\
 \tilde{w}_{2j-1, 2j} &= \int_{j(t_I+t_{on})}^{\infty} f_S(x) dx \int_{j(t_I+t_{on})}^{\infty} f_{C,i}(y), \quad j = 1, \dots, n_{CSS} \\
 \tilde{w}_{2j-1, 2j} &= \int_{j(t_I+t_{on})}^{\infty} f_S(x) dx \int_{j(t_I+t_{on})}^{\infty} f_{C,i}(y), \quad j = 1, \dots, n_{CSS} \\
 \tilde{w}_{2j, 2j+1} &= 1, \quad j = 1, \dots, n_{CSS} \\
 \tilde{w}_{2j+1, 1} &= \int_0^{j(t_I+t_{on})} f_O(x) dx \int_{j(t_I+t_{on})}^{\infty} f_{C,i}(y), \quad j = 1, \dots, n_{CSS}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

$\tilde{w}_{i,j} = 0$, в противном случае

Применяя подход, описанный в начале главы, можем найти среднее число переходов из состояния "On Duration" до поглощения. Это позволяет найти вероятность перехода из состояния "On Duration" в длительный цикл сна C-DRX, как показано ниже

$$p_{CLS} = d_{1,2n_{CSS}+1} / \sum_{j=1}^{n_{CLS}} d_{1,2j+1} \quad (2.22)$$

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

$$w_{3,2} = (1 - p_{CLS}) \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_{C,i}(y) dy. \quad (2.23)$$

$$w_{3,4} = p_{CLS} \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_{C,i}(y) dy. \quad (2.24)$$

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

$$w_{3,0} = \int_{t_{CSS}}^{\infty} f_S(x) dx \quad (2.25)$$

Поскольку за сном DRX всегда следует период "On Duration", единственная вероятность перехода на выход для состояния 4 равна:

$$w_{4,5} = 1 \quad (2.26)$$

Далее, после длительного сна всегда есть последующий период "On Duration», состояние 5, когда ПУ решает, продолжать ли спать или вернуться в активное состояние, состояние 1. Аналогично состоянию 3, мы выводим вероятности перехода из состояния 5 в последовательный длительный сон:

$$w_{5,4} = (1 - p_{ISS}) \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_{C,i}(y) dy. \quad (2.27)$$

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

$$w_{5,6} = p_{ISS} \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_{C,i}(y) dy. \quad (2.27)$$

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:

$$w_{5,1} = \int_0^{t_{CLS}} f_S(x) dx \cdot \int_{t_{CLS}}^{\infty} f_{C,i}(y) dy, \quad (2.28)$$

$$w_{5,0} = \int_0^{t_{CLS}} f_{C,i}(x) dx. \quad (2.29)$$

В наборе состояний RRC-Inactive существует аналогичное соответствие между парами состояний 6 и 2, 7 и 3, 8 и 4, 9 и 5. Чтобы их найти, необходимо заменить длительность времени сна, которые определены в таблице 2.1 [12], [15], [18].

Таблица 2.1. Параметры системы DRX

Обозначение	Описание	Значение
t_I	Время бездействия	2 мс
t_{on}	Время «On Duration»	2 мс
t_{CSS}	Таймер короткого сна C-DRX	5 мс
t_{CLS}	Таймер длительного сна C-DRX	32 мс
t_{ISS}	Таймер короткого сна I-DRX	64 мс
t_{ILS}	Таймер длительного сна I-DRX	256 мс
n_{CSS}	Количество циклов короткого сна в C-DRX	2
n_{CLS}	Количество циклов длительного сна в C-DRX	3
n_{ISS}	Количество циклов короткого сна в I-DRX	2
n_{ILS}	Количество циклов длительного сна в I-DRX	∞
k_{BS}	Коэффициент шкалы сна БС	1,2

Единственное отличие состоит в том, что в состоянии 9 нет перехода к циклу сна.

2.3. Интересующие метрики

Определив параметры поглощающей цепи Маркова, теперь можем оценить интересующие нас метрики. Мы рассчитываем среднее энергопотребление для непрерывной связи с БС следующим образом:

$$P_C = \vec{\tau} \vec{e} \quad (2.30)$$

где \vec{e} - вектор констант энергопотребления в состояниях 1 - 9.

Мы предполагаем, что отключение может быть вызвано временем соединения с соответствующей БС, процедурой управления отказом луча t_{BFM} в случае рассогласования луча, и управлением отказом радиоканала t_{RLF} в случае блокировки LoS. Поскольку предполагается, что моменты вышеупомянутых событий независимы, в дальнейшем мы используем половину периодов для оценки общего времени простоя T_W , затраченного на возвращение ПУ в активный режим работы, как

$$T_W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N P_i \left(P_{S,i} \sum_{j=1}^4 \pi_j t_{2j} + \sum_{j=1}^9 \pi_j q_{j,0} t_{BFM,j} \right) + \frac{1}{2} P_B t_{RLF,j} \quad (2.31)$$

где $P_{S,i} = 1 - \frac{\tau_{i,1}}{\lambda_0 \int_0^{\infty} t \cdot f_{C_i}(t) dt}$ — это вероятность нахождения i -й БС в спящем режиме.

Поскольку DRX подразумевает дополнительное отключение из-за цикла сна, энергопотребление (2.7) теперь будет определяться как

$$E_{DRX}[C] = \frac{E[T_L] - T_W}{E[T_{NL}] + E[T_L]} E[C_{T_L}] \quad (2.32)$$

в то время как доля времени простоя из-за сна ПУ может быть найдена как

$$T_{DS} = \frac{T_W}{E[T_{NL}] + E[T_L]} \quad (2.33)$$

Аналогично, доля времени простоя из-за отсутствия связи, определяется как

$$T_{DO} = \frac{E[T_{NL}]}{E[T_{NL}] + E[T_L]} \quad (2.34)$$

Наконец, энергоэффективность может быть получена как

$$P_E = \frac{E_{DRX}[C]}{P_C} \quad (2.35)$$

3. Численный анализ энергоэффективности передачи данных в терагерцевом диапазоне

Для проведения численного анализа характеристик энергоэффективности передачи данных в терагерцевом диапазоне было разработано скрипт в среде Wolfram Mathematica, позволяющий выполнять вычисления по аналитическим формулам.

Входные параметры для оценки энергоэффективности приведены в таблицах 2.1 и 3.1 в соответствии с [33],[35].

Таблица 3.1. Данные для численного эксперимента

Обозначение	Описание	Значение
λ_A	Плотность БС	0,001 ед./м ²
λ_B	Плотность блокаторов	0,3 ед./м ²
r_B	Радиус блокатора	0,4 м
h_B	Высота блокатора	1,7 м
h_U	Высота ПУ	1,5 м
h_A	Высота БС	4 м
v	Скорость блокатора	1 м/с
P_T	Излучаемая мощность передающей антенны	2 Вт
ζ	Коэффициент затухания сигнала в незаблокированном состоянии	2,1
M_I	Граница затухания сигнала	3 дБ
T_P	Время обновления поиска луча	10 мс
N_T	Число антенных элементов на БС	16x4
N_U	Число антенных элементов на ПУ	4x4
N	Число БС	3
N_0	Шум	-84дБ
$\Delta\theta = \Delta\phi$	Среднее смещение вокруг осей ОХ и ОУ	0,1 °/с
λ_0	Интенсивность переключения в активный режим	2 с ⁻¹
λ_S	Интенсивность переключения в режим ожидания	0,5 с ⁻¹

Используя аналитические результаты, полученные в разделе 2.3, можно вычислить характеристики системы и провести их анализ.

Эксперимент 1. На Рис. 3.1 представлен график зависимости доли времени простоя от микромобильности при степени мультисвязности $N = 3$.

Как можно заметить, доля времени простоя резко возрастает при увеличении угловой скорости подвижности $\Delta\theta$ и $\Delta\phi$.

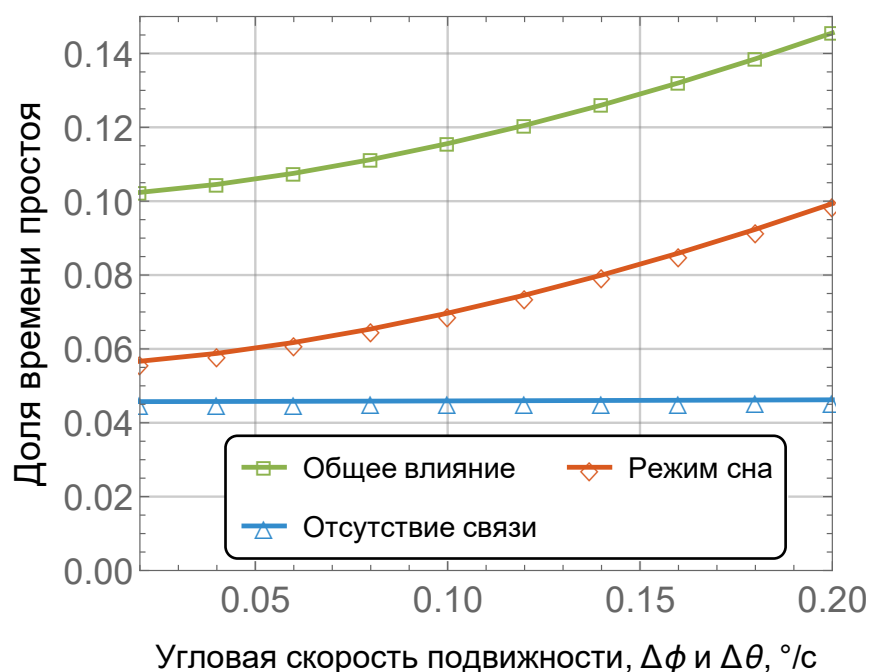


Рис. 3.1. Доля времени простоя в зависимости от микромобильности

Полученный результат вызван временем поиска луча, а не фактическим отсутствием связи. Ведь рассматривая влияние только отсутствия связи, можно заметить, что доля времени простоя остается практически неизменной при увеличении скорости микроподвижности от 0,01 до 0,2 $^{\circ}/с$. Это объясняется тем, что с ростом $\Delta\theta$ и $\Delta\phi$ ПУ чаще находится в состоянии поиска луча, проводя меньше времени в режиме активной работы. Таким образом, именно частота смещения антенн в основном влияет на долю времени простоя.

Эксперимент 2. График, иллюстрирующий влияние блокировки, рис. 3.2, показывает принципиально иное поведение.

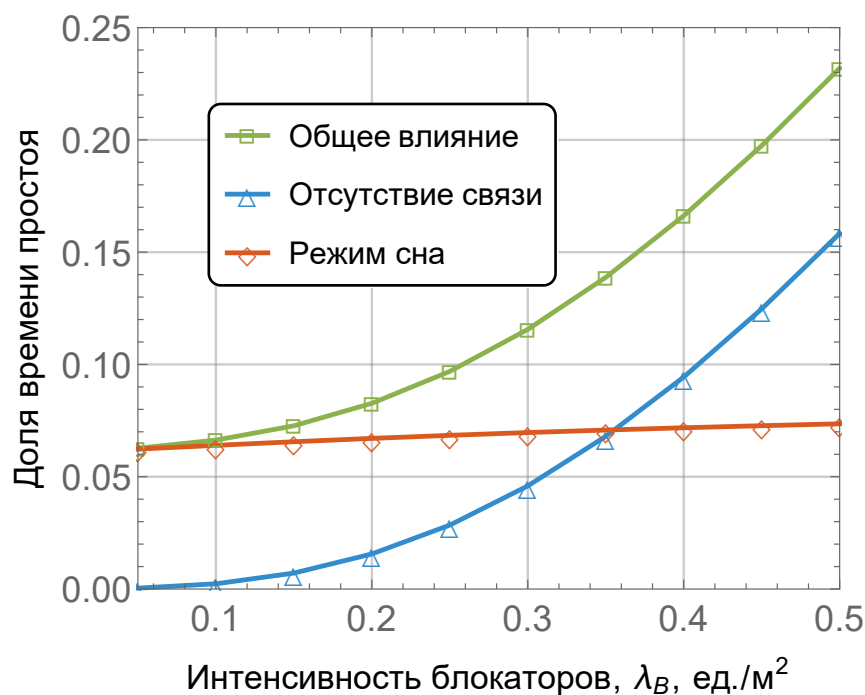


Рис. 3.2. Доля времени простоя в зависимости от интенсивности блокаторов

Здесь мы наблюдаем, что доля времени простоя возрастает. Однако это происходит в основном в результате отсутствия связи, а не из-за поиска луча. Поскольку длительность блокировки намного превышает время поиска луча, увеличение плотности блокаторов не приводит к резкому увеличению доли времени простоя и, следовательно, нет необходимости часто переключаться между БС. Однако большая плотность блокаторов приводит к увеличению вероятности одновременной блокировки всех каналов, что увеличивает долю времени простоя.

Эксперимент 3. Влияние степени мультисвязности показано на Рис. 3.3. Можно заметить, что увеличение числа БС резко уменьшает простои в результате одновременной блокировки каналов.

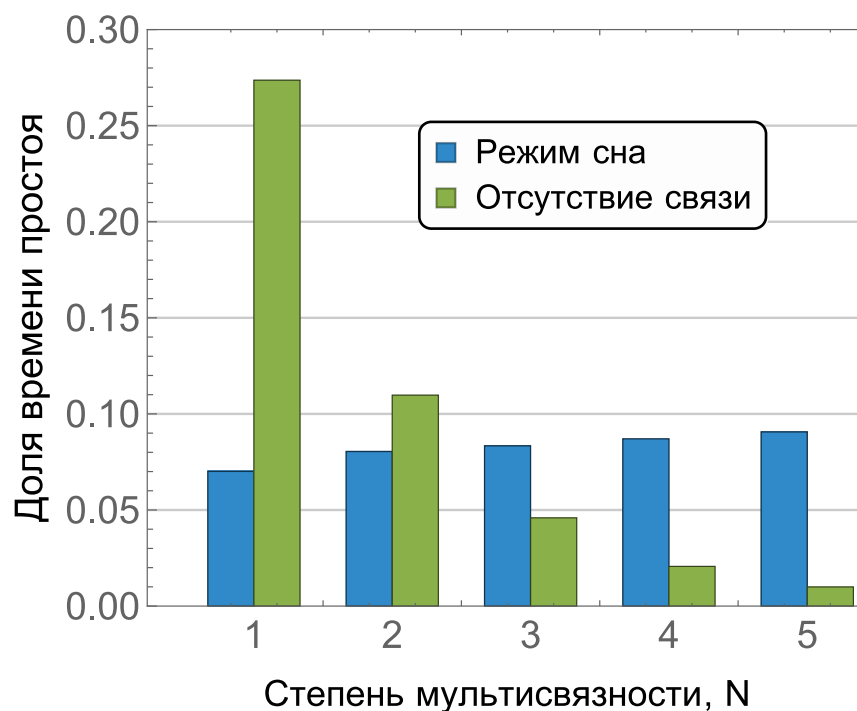


Рис. 3.3. Доля времени простоя в зависимости от степени мультисвязности

В то же время, потери, вызванные пребыванием в режиме сна, незначительно растут. Это объясняется тем, что при увеличении степени мультисвязности ПУ начинает связываться с БС, расположенными дальше и, следовательно, имеющими большие таймеры сна. Первый эффект все же преобладает, но общее влияние степени мультисвязности менее выражено по сравнению с данными, полученными в [3], [25]. Однако мы видим, что использование степени мультисвязности выше $N=4$ не дает значительного улучшения с точки зрения доли времени простоя.

Далее рассмотрим графики зависимости энергопотребления от аналогичных параметров: микромобильности, интенсивности блокировок и степени мультисвязности. Следует отметить, что помимо общего энергопотребления, на графиках будет показано количество энергии, потребляемой активными и резервными каналами, а также энергия, потребляемая при изменении процедуры управления радиоканалом и управления лучом. В данном случае, под управлением радиоканалов будет пониматься переключение на другую БС. А процедура поиска луча будет выполняться в случае сбоя, вызванных микромобильностью.

Эксперимент 4. Начнем с влияния микромобильности, показанного на Рис. 3.4. Можно заметить, что при увеличении угловой скорости микроподвижности, ведущей к перебоям связи, резко увеличивается потребление энергии.

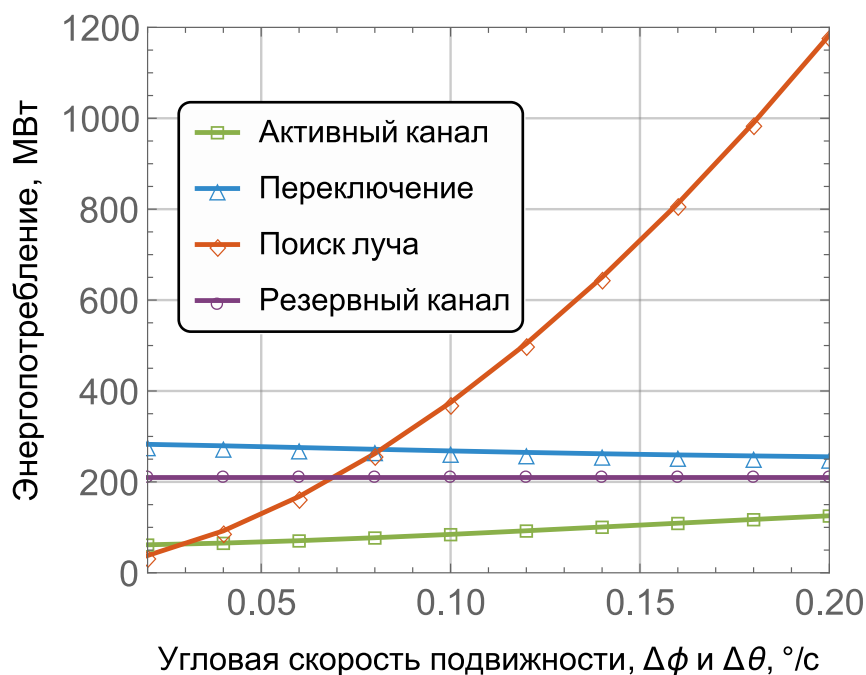


Рис. 3.4. Энергопотребление в зависимости от микромобильности

Причина в том, что это явление приводит к частым сменам БС при каждом выходе ПУ из спящего режима. С другой стороны, влияние микромобильности на другие компоненты энергопотребления пренебрежимо мало, лишь незначительно увеличивается расход энергии для активного в данный момент канала. Этот эффект вызван тем, что при более высокой скорости микромобильности ПУ тратит больше времени на соединение с БС, расположенной близко к ПУ.

Эксперимент 5. Переходя к зависимости от плотности блокаторов, показанной на Рис. 3.5, снова можно заметить иное поведение по сравнению с предыдущим экспериментом.

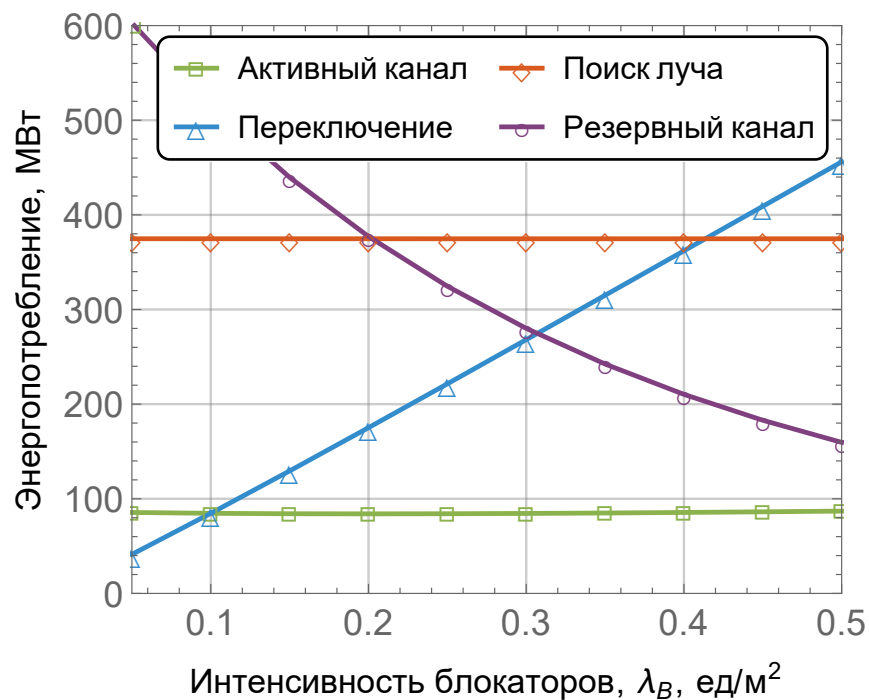


Рис. 3.5. Энергопотребление в зависимости от интенсивности блокаторов

Интересный эффект состоит в следующем: по мере увеличения плотности блокаторов, количество энергии, необходимой для переключения к БС, линейно увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением вероятности блокировки увеличивается доля времени, которая ПУ проводит в условиях отсутствия связи, и, следовательно, процедура поиска луча выполняется чаще. Однако это почти полностью компенсируется сопоставимым снижением мощности, необходимой для резервных каналов связи из-за блокировки. Два других компонента остаются неизменными. Это означает, что плотность блокаторов не влияет на энергопотребление.

Эксперимент 6. На Рис. 3.6 показаны затраты энергии на активные и резервные каналы, а также на переключение и поиск луча в зависимости от числа БС.

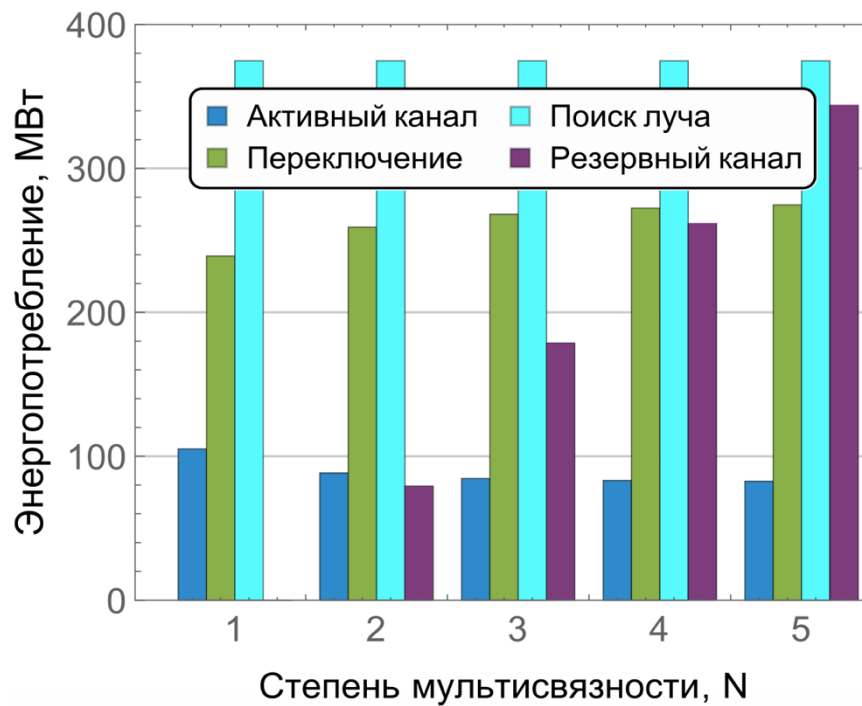


Рис. 3.6. Энергопотребление в зависимости от степени мультисвязности

На графике видно, что затраты энергии на поддержание резервных каналов резко возрастают по мере увеличения степени мультисвязности. Уже при $N = 2$ эта составляющая становится сопоставимой с затратами энергии на активный канал. Также можно отметить, что процедура поиска луча лидирует в энергопотреблении. На нее тратится в 2 - 3 раза больше энергии, чем на работу в активном режиме связи.

Полученные выше результаты демонстрируют сложный компромисс между долей времени простоя и энергопотреблением. Кроме того, следует отметить, что микромобильности и блокировка имеют разную природу перебоев. Вот почему перейдем к исследованию такой метрики как энергоэффективность, которая измеряет количество бит, переданных на джоуль на КГц.

Эксперимент 8. Анализируя влияние микромобильности на эту метрику, можно заметить, что с увеличением скорости микроподвижности, энергоэффективность снижается.

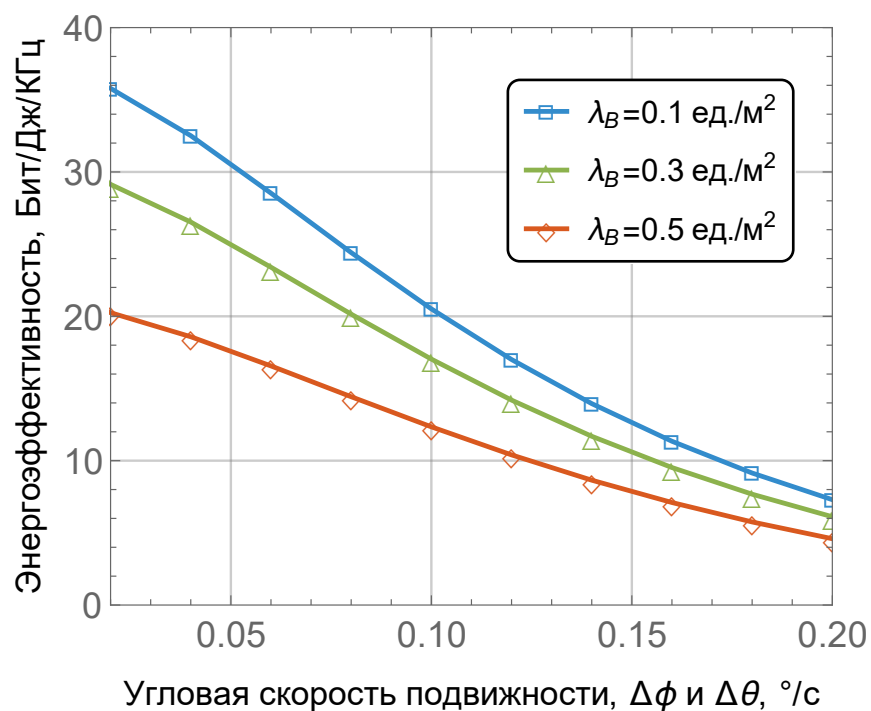


Рис 3.7 Энергоэффективность в зависимости от микромобильности

Это объясняется тем, что с ростом микромобильности увеличивается потребление энергии и доля времени простоя.

Эксперимент 9. Аналогичный эффект наблюдается и на Рис. 3.8, где показано влияние плотности блокаторов.

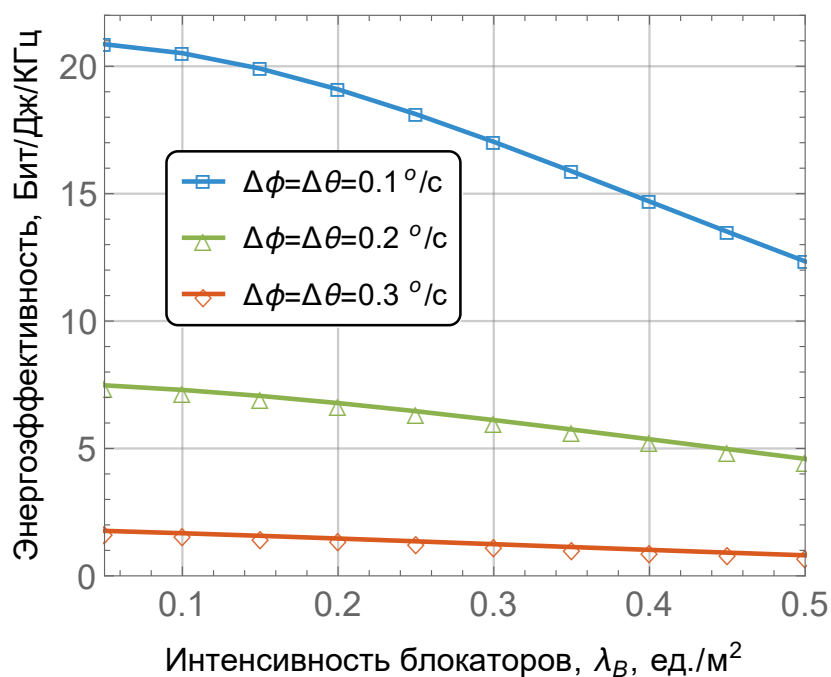


Рис 3.8 Энергоэффективность в зависимости от интенсивности блокаторов

Как можно заметить, для более высокой скорости микромобильности влияние увеличения плотности блокаторов пренебрежимо мало. В частности, увеличение скорости микромобильности с 0,1 %/с. до 0,3 %/с. приводит к снижению энергоэффективности с приблизительно 21 бит/Дж/КГц до 3 бит/Дж/КГц для 0,1 ед./м².

В то же время, при сохранении постоянной скорости микромобильности, равной 0,1%/с. в данном эксперименте, и увеличении плотности блокаторов с 0,1 ед./м² до 0,3 ед./м² энергоэффективность снижается с 21 бит/Дж/КГц до 17 бит/Дж/КГц. Следует напомнить, что это наблюдение справедливо для достаточно высокой степени мультисвязности $N = 3$. Таким образом, можно сделать вывод, что микромобильность оказывает основное влияние на энергоэффективность и не может быть улучшена за счет использования мультисвязности.

Эксперимент 9. Исходя из эксперимента 8 следует проверить влияние степени мультисвязности на энергоэффективность.

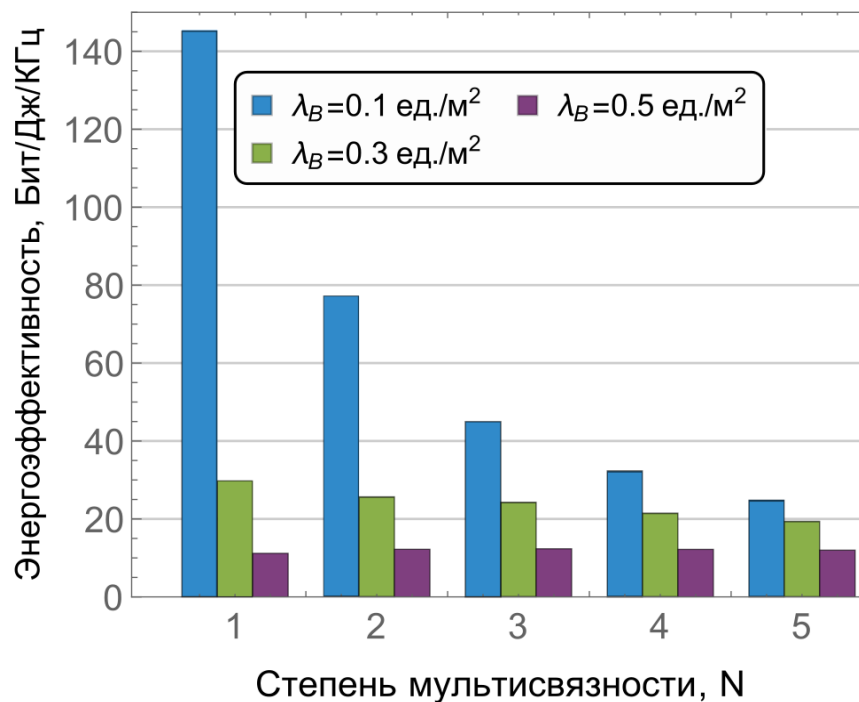


Рис 3.9 Энергоэффективность в зависимости от степени мультисвязности

На Рис. 3.9 показано, что для постоянной скорости микромобильности, равной 0,1 %/с, и плотности блокаторов, равной 0,3 ед./м², энергоэффективность сильно

зависит от степени мультисвязности, а именно, наблюдаются значительные потери производительности при увеличении этого параметра. Однако при увеличении плотности блокаторов можно заметить, что мультисвязность позволяет сохранить ту же энергоэффективность для всех рассмотренных значений степени мультисвязности.

Обращаясь к полученным ранее результатам, а именно к Рис. 3.3, можно сделать вывод, что при высокой плотности блокаторов использование мультисвязности настоятельно рекомендуется.

Заключение

В ходе написания выпускной квалификационной работы магистра были получены следующие результаты:

- изучены методы повышения энергоэффективности, мультисвязность и микромобильность в системах терагерцевого диапазона частот;
- предложена аналитическая схема, способная отразить системную динамику мультисвязности и энергосберегающих операций DRX как при микромобильности, так и при блокировках LoS;
- проведен численный анализ характеристик энергоэффективности передачи данных в терагерцевом диапазоне частот.

Исследования показали, что мультисвязность и блокировка по-разному влияют на долю времени простоя: микромобильность в основном влияет на нее через время поиска луча, увеличивая интенсивность ожидания, в то время как блокировка LoS увеличивает продолжительность нахождения в режиме ожидания. С другой стороны, микромобильность положительно влияет на энергопотребление из-за частой смены БС, в то время как плотность блокаторов не влияет на энергопотребление.

Объединив долю времени простоя и потребление энергии в общую метрику - энергоэффективность, было показано, что микромобильность оказывает преобладающее влияние на энергоэффективность из-за высокого потребления энергии для управления радиоканалом и лучом, а мультисвязность не может улучшить производительность для приложений с высокой скоростью микромобильности. С другой стороны, увеличение степени мультисвязности приводит к ухудшению энергоэффективности при малой плотности блокаторов, однако при высокой плотности блокаторов она позволяет улучшить энергоэффективность и рекомендуется для таких режимов работы. Исследования продемонстрировали, что оптимальная степень мультисвязности зависит от многих внешних факторов, включая скорость микромобильности и плотность блокаторов, и должна динамически обновляться во время работы ПУ в зависимости от этих факторов.

Задачей дальнейших исследований является изучение влияния масштабирования таймеров алгоритма прерывистого приёма DRX на такие

характеристики как доля времени простоя, энергоэффективность и энергопотребление пользовательского устройства.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, д.ф.-м.н. Гайдамака Ю.В. и профессору университета Тампере (Финляндия), д.т.н. Молчанову Д.А. за постановку задачи и рекомендации во время выполнения исследований. Также автор глубоко признателен ассистенту кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, к.ф.-м.н. Бесчастному В.А за помощь в разработке математической модели и доценту, к.ф.-м.н. Остриковой Д.Ю. за полезные советы на каждом этапе написания выпускной квалификационной работы магистра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 3GPP, «Advanced plans for 5G», <https://www.3gpp.org/news-events/2210-advanced-5g>, 3GPP, 2021.
2. 3GPP, «NR; Multi-connectivity; stage 2 (Release16)», 3GPP TS 37.340 V16.0.0, 3GPP, December 2019.
3. M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, M. R. Akdeniz, S. Andreev, N. Himayat, and Y. Koucheryavy, «On the degree of multi-connectivity in 5G millimeter-wave cellular urban deployments», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1973–1978, 2019.
4. M. Gerasimenko, D. Moltchanov, M. Gapeyenko, S. Andreev, and Y. Koucheryavy, «Capacity of multiconnectivity mmWave systems with dynamic blockage and directional antennas», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3534–3549, 2019.
5. M. F.Özkoç, A. Koutsaftis, R. Kumar, P. Liu, and S. S. Panwar, «The impact of multi-connectivity and handover constraints on millimeter wave and terahertz cellular networks», *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 6, pp. 1833–1853, 2021.
6. V. Begishev, E. Sopin, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, A. Samuylov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov, «Performance analysis of multi-band microwave and millimeter-wave operation in 5G NR systems», *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 3475–3490, 2021.
7. V. Begishev, D. Moltchanov, E. Sopin, A. Samuylov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov, «Quantifying the impact of guard capacity on session continuity in 3GPP New Radio systems», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 12345–12359, 2019.
8. T. Kim, Y. Kim, Q. Lin, F. Sun, J. Fu, Y. Kim, A. Papasakellariou, H. Ji, and J. Lee, «Evolution of power saving technologies for 5G New Radio», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 198912–198924, 2020.
9. J. Perdomo, M. Ericsson, M. Nordberg, and K. Andersson, «User performance in a 5G multi-connectivity ultra-dense network city scenario», in *2020 IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pp. 195–203, IEEE, 2020.

10. 3GPP, «Technical specification group radio access network; NR; Radio Resource Control (RRC) protocol specification; (Release 15)», 3GPP TS 38.331 V15.6.0, 3GPP, June 2019.
11. Y.-N. R. Li, M. Chen, J. Xu, L. Tian, and K. Huang, «Power saving techniques for 5G and beyond», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108675–108690, 2020.
12. L. Sharma, B. B. Kumar, and S.-L. Wu, «Performance analysis and adaptive DRX scheme for dual connectivity», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 10289–10304, 2019.
13. 3GPP, «5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; stage 2 (Release 15)», 3GPP TS 38.300 V15.11.0, 3GPP, November 2020.
14. IWPC, «5G millimeter wave frequencies and mobile networks a technology whitepaper on key features and challenges», technical report, IWPC, June 2019.
15. M. Lauridsen, D. Laselva, F. Frederiksen, and J. Kaikkonen, «5G New Radio user equipment power modeling and potential energy savings», in *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, pp. 1–6, 2019.
16. N. Saxena, A. Roy, M. K. Maheswari, E. Rastogi, and D. R. Shin, «DRX in New Radio Unlicensed: A Step Beyond 5G Wireless», *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 82–88, 2021.
17. 3GPP, «3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; NR; study on user equipment (UE) power saving in NR; (Release 16)», 3GPP TR 38.840 V16.0.0, 3GPP, June 2019.
18. S. H. A. Shah, S. Aditya, and S. Rangan, «Power-efficient beam tracking during connected mode DRX in mmWave and sub-THz systems», *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 6, pp. 1711–1724, 2021.
19. M. Maharazu, Z. M. Hanapi, and M. A. Alrashah, «Energy and spectral efficiency balancing algorithm for energy saving in LTE downlinks», *Symmetry*, vol. 13, no. 2, 2021.
20. P. Arunagiri and G. Nagarajan, «Impact of DRX parameters on user equipment power saving and delay reduction in LTE networks», *Advances in Modelling and Analysis D*, vol. 23, pp. 1–5, December 2018.
21. S. Hailu, M. Saily, and O. Tirkkonen, «RRC state handling for 5G», *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 1, pp. 106–113, 2019.

22. M. Kumar Maheshwari, M. Agiwal, and A. Rashid Masud, «Analytical modeling for signaling-based DRX in 5G communication», *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 32, no. 1, pp. 1–18, 2021.
23. S. Rostami, S. Lagen, M. Costa, M. Valkama, and P. Dini, «Wake-up radio-based access in 5G under delay constraints: Modeling and optimization», *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 2, pp. 1044–1057, 2020.
24. M. Polese, M. Giordani, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, «Improved handover through dual connectivity in 5G mmWave mobile networks», *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, pp. 2069–2084, Sept. 2017.
25. D. Moltchanov, Y. Gaidamaka, D. Ostrikova, V. Beschastnyi, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov, «Ergodic outage and capacity of terahertz systems under micromobility and blockage impairments», *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 1–16, 2021.
26. V. Poirot, M. Ericson, M. Nordberg, and K. Andersson, «Energy efficient multi-connectivity algorithms for ultra-dense 5G networks», *Wireless Networks*, pp. 2207–2222, June 2019.
27. P. Nain, D. Towsley, B. Liu, and Z. Liu, «Properties of random direction models», in *IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, pp. 1897–1907, March 2005.
28. 3GPP, «Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 14)», 3GPP TR 38.901 V14.1.1, 3GPP, July 2017.
29. R. Kovalchukov, D. Moltchanov, A. Samuylov, A. Ometov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov, «Evaluating SIR in 3D millimeter-wave deployments: Direct modeling and feasible approximations», *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 879–896, 2019.
30. V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, and Y. Koucheryavy, «Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas», *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, pp. 1791–1808, March 2017.
31. N. V. Stepanov, D. Moltchanov, V. Begishev, A. Turlikov, and Y. Koucheryavy, «Statistical analysis and modeling of user micromobility for THz cellular communications», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021.

32. V. Petrov, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, and J. M. Jornet, «The effect of small-scale mobility on terahertz band communications», in *Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, pp. 1–2, 2018.
33. R. Singh and D. Sicker, «Parameter modeling for small-scale mobility in indoor THz communication», in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, IEEE, 2019.
34. V. Petrov, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, and J. M. Jornet, «Capacity and outage of terahertz communications with user micro-mobility and beam misalignment», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020.
35. S. Singh, R. Mudumbai, and U. Madhow, «Interference analysis for highly directional 60-GHz mesh networks: The case for rethinking medium access control», *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, pp. 1513–1527, October 2011.
36. A. B. Constantine *et al.*, «Antenna theory: analysis and design», *Microstrip Antennas*, John Wiley & Sons, 2005.
37. G. Basharin, Y. Gaidamaka, and K. Samouylov, «Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of next generation networks», *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 47, pp. 62–69, 2013.
38. 3GPP, «NR; Physical channels and modulation (Release 15)», 3GPP TR 38.211, 3GPP, Dec 2017.
39. D. Moltchanov, «Distance distributions in random networks», *Elsevier Ad Hoc Networks*, vol. 10, pp. 1146–1166, August 2012.
40. M. Gapeyenko, A. Samuylov, M. Gerasimenko, D. Moltchanov, S. Singh, E. Aryafar, S.-p. Yeh, N. Himayat, S. Andreev, and Y. Koucheryavy, «Analysis of human-body blockage in urban millimeter-wave cellular communications», in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7, IEEE, 2016.
41. J. G. Kemeny, J. L. Snell, *et al.*, *Finite markov chains*, vol. 356. Van Nostrand Princeton, NJ, 1960.
42. V. Naumov, Y. Gaidamaka, N. Yarkina, and K. Samouylov, *Matrix and Analytical Methods for Performance Analysis of Telecommunication Systems*. Springer Nature Switzerland AG, 2021.



СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

**XII Всероссийской конференции
(с международным участием)
«Информационно-телекоммуникационные
технологии и математическое моделирование
высокотехнологичных систем»**

18 – 22 апреля 2022 года

**в секции Сети связи следующего поколения:
управление, качество, архитектура**

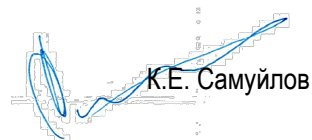
вручается

Голос Елизавете Сергеевне

за доклад

Модель энергопотребления устройства в режиме прерывистого
приёма DRX в сети 5G NR

Председатель программного комитета,
д.т.н., профессор



К.Е. Самуйлов

Приложение 2. Исходный код программной реализации численных расчетов влияния интенсивности блокаторов на долю времени простоя и энергопотребление

$N_{max} = 3; PT = 2;$

$GASet = \{10^{(0.1*11.57)}, 10^{(0.1*14.58)}, 10^{(0.1*17.58)}, 10^{(0.1*20.58)}\};$

$GUSet = \{10^{(0.1*2.57)}, 10^{(0.1*5.57)}, 10^{(0.1*8.57)}, 10^{(0.1*11.58)}\};$

$NASet = \{16\ 4, 32\ 4, 64\ 4, 128\ 4\}; NUSet = \{2\ 2, 4\ 4, 8\ 4, 16\ 4\};$

$GA = GASet[[2]]; GU = GUSet[[2]];$

$ZT = 2.1; k = 0.2; N0 = 10^{(0.1*(-84))}; MT = 10^{(0.1*3)};$

$LambdaA = 0.001; \backslash[Lambda]O = 2; \backslash[Lambda]S = \backslash[Lambda]O / 4;$

$pOperation = 1/(1 + \backslash[Lambda]O/\backslash[Lambda]S); \backslash[Lambda]B = 0.3;$

$hA = 4; hU = 1.5; hB = 1.7;$

$NA = NASet[[1]]; NU = NUSet[[2]];$

$\backslash[CapitalDelta]\backslash[Phi] = 0.1; \backslash[CapitalDelta]\backslash[Theta] = 0.1;$

$M\backslash[CapitalPhi]\backslash[CapitalTheta] = ((102\ N[Pi, 10])/360) (1/NA + 1/NU);$

$D\backslash[Phi] = \backslash[CapitalDelta]\backslash[Phi]^2/2;$

$D\backslash[Theta] = \backslash[CapitalDelta]\backslash[Theta]^2/2;$

$\backslash[CapitalDelta]TB = 2\ 10^{-6};$

$TB = (NA + NU) \backslash[CapitalDelta]TB; TP = 10^{-2};$

$rBl = 0.4; vBl = 1;$

$tInactivity = 4\ 10^{-3}; tOn = 2\ 10^{-3}; tCSS = 8\ 10^{-3}; tCLS = 4\ tCSS; tISS = 64\ 10^{-3};$

$tILS = 4\ tISS; timerMult = 1.2; nCSS = 3; nCLS = 1; nISS = 3; BFICounter = 2;$

$\backslash[Pi]vecDRX = \{\{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}, \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}, \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}, \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}, \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}\};$

$EvecDRX = \{350, 45, 61, 20, 61, 20, 61, 1, 61\};$

$ERACH = 376.5; ESSB = 100;$

$TBSet = \{(NA + NU) \backslash[CapitalDelta]TB, (NA * NU) \backslash[CapitalDelta]TB\};$

$kSet = \{0., 0.1, 0.2, 0.3\}; \backslash[Lambda]BMin = 0.05;$

```

LoopStart = 1; LoopEnd = 10; LoopStep = 1; MeanDelay = List[];

NoConnectivityProbOverall = List[]; NoConnectivityProbDueToSleep = List[];

NoConnectivityProbDueToOutage = List[]; PowerConsumptionOverall = List[];

PowerConsumptionActive = List[]; PowerConsumptionBackup = List[];

PowerConsumptionPassive = List[]; PowerConsumptionReconnection = List[];

PowerConsumptionBeamsearching = List[];

For[CapitalDelta[Lambda]B = LoopStart, CapitalDelta[Lambda]B <= LoopEnd,
CapitalDelta[Lambda]B += LoopStep, {Lambda]B = Lambda]BMin
CapitalDelta[Lambda]B];

TB = TBSet[[1]];

k = kSet[[kIter]];

M[CapitalPhi][CapitalTheta] = ((102 N[Pi, 10])/360) (1/NA + 1/NU);

D[Phi] = CapitalDelta[Phi]^2/2;

D[Theta] = CapitalDelta[Phi]^2/2;

ClearAll[S, fi];

S[x_] := S[x] = PT*GA*GU*((x^(-ZT)* Exp[-k*x])/(N0*MT));

Clear[f[Phi], f[Theta], F[Phi], F[Theta], fTA, fTAExp];

f[Phi][t_] := f[Phi][t] = (Abs[M[CapitalPhi][CapitalTheta]]/(\Sqrt[4 N[Pi,10] D[Phi] t^3])) E^(-
(M[CapitalPhi][CapitalTheta]^2/(4 D[Phi] t)));

F[Phi][t_] = Integrate[f[Phi][Tau], {Tau, 0, t}];

f[Theta][t_] := f[Theta][t] = (Abs[M[CapitalPhi][CapitalTheta]]/(\Sqrt[4 N[Pi, 10] D[Theta]
t^3])) E^(- (M[CapitalPhi][CapitalTheta]^2/(4 D[Theta] t)));

F[Theta][t_] = Integrate[f[Theta][Tau], {Tau, 0, t}];

fTA[t_] := f[Phi][t] (1 - F[Theta][t]) + f[Theta][t] (1 - F[Phi][t]);

meanMM := NIntegrate[Tau] fTA[Tau], {Tau, 0, 100};

fTAExp[t_] := Exp[-t/meanMM] / meanMM;

Clear[fTAExp];

fTAExp[t_] := 1 - Exp[-t/meanMM];

fi = Table[With[{i = i}, ((2* (Pi*LambdaA)^i)/((i - 1)!)) * #^(2*i - 1) * (Exp[-LambdaA*Pi*#^2] &),
{i, 1, Nmax}];

```

```

ClearAll[Ec];

Ec = Table[NIntegrate[Log2[1 + S[x]]*fi[[i]][x], {x, 0.01, 1000}], {i, 01, Nmax}];

For[i = 1, i <= Nmax, i++, PNi[i] = 1 - NIntegrate[fi[[i]][x]*Exp[-2*x*rBl*\[Lambda]B*((hB -
hU)/(hA - hU))], {x, 0.0001, 1000}]];

PN = Product[PNi[i], {i, 1, Nmax}];

ClearAll[Ti];

Ti = Table[(1 - PNi[i]) \!\(*UnderoverscriptBox[\([Product]), \(\kappa = 1\), \(\i - 1\)](PNi[\kappa])\), {i, 1,
Nmax}];

ClearAll[Capacity];

Capacity = \!\(*UnderoverscriptBox[\([Sum]), \(\i = 1\), \(\Nmax\)](Ti[\(\i\)](J))\]
Ec[\(\i\)](J)\);

For[i = 1, i <= Nmax, i++,

muBi[i] = NIntegrate[fi[[i]][x]*(2*rBl*\[Lambda]B*vBl*(x*(hB - hU) + rBl*(hA - hU)))/(hA - hU),
{x, 0, Infinity}]];

fTLi := Table[With[{i = i}, muBi[i] Exp[-muBi[i] #] &], {i, 1, Nmax}];

FTLi := Table[With[{i = i}, 1 - Exp[-muBi[i] #] &], {i, 1, Nmax}];

meanBL = Table[muBi[i]^-1, {i, 1, Nmax}];

\[CapitalDelta]B = 1/200;

\[CapitalDelta]Min = 200/200;

\[CapitalDelta]TMP = 1/20000;

endD = 0.0005;

maxConT = 8/2;

TransDistCDF[x_] := TransDistCDF[x] = \!\(*TagBox[GridBox[{"\[Piecwise]", GridBox[{"0",
RowBox[{"x", "<=", "0"}]},
{"1", RowBox[{"x", ">", RowBox[{"2", "rBl", " ", "vBl"}]}]}],
AllowedDimensions->{2, Automatic},

Editable->True,

GridBoxAlignment->{"Columns" -> {{Left}}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {{Baseline}},
"RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {}, "ItemsIndexed" -> {}},

GridBoxItemSize->{"Columns" -> {{Automatic}}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {{1.}},
"RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {}, "ItemsIndexed" -> {}},

```

```

GridBoxSpacings->{"Columns" -> {
Offset[0.2799999999999997], {
Offset[0.84]},
Offset[0.2799999999999997]}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {
Offset[0.2], {
Offset[0.4]},
Offset[0.2]}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {}, "ItemsIndexed" -> {}},Selectable->True]],
GridBoxAlignment->{"Columns" -> {{Left}}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {{Baseline}},
"RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {}, "ItemsIndexed" -> {}},
GridBoxItemSize->{"Columns" -> {{Automatic}}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {{1.}},
"RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {}, "ItemsIndexed" -> {}},
GridBoxSpacings->{"Columns" -> {
Offset[0.2799999999999997], {
Offset[0.35]},
Offset[0.2799999999999997]}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {
Offset[0.2], {
Offset[0.4]},
Offset[0.2]}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {},
"ItemsIndexed" -> {}},
"Piecewise",
DeleteWithContents->True,
Editable->False,
SelectWithContents->True,
Selectable->False]);
ClearAll[B, BB];
B[x_] := TransDistCDF[x];
BB[x_] := 1 - B[x]; ClearAll[BBI];
BBI[x_] := BBI[x] = Integrate[BB[u], {u, 0.001, 100},

```

```

Assumptions -> x \[Element] Reals ];

ClearAll[ZZ, endTReal, ii, ZZtmp];

ZZ[0] = 1;

endTReal = 0;

ii = 0;

ZZtmp = 1;

\[Lambda] = muBi[1];

While[

ZZtmp >

endD && (ii <= \[CapitalDelta]Min ||

ZZtmp < ZZ[ii - \[CapitalDelta]B])(* && (ii < maxConT)*),

(*If[Mod[ii,1]\[Equal]0,Print["NLoS distribution: "<>ToString[ii]<>

", Value: "<>ToString[ZZtmp]]];*)

ZZ[ii] = ZZtmp;

ii += \[CapitalDelta]B;

ZZtmp = ZZ[ii] /. First @@ Solve[

ZZ[ii] ==

BB[ii] +

muBi[1]*Sum[(ZZ[ii - v]*

Exp[-muBi[1]*BBI[v]]*(BB[v] - BB[ii]) +

ZZ[ii - v - \[CapitalDelta]B]*

Exp[-muBi[1]*

BBI[v + \[CapitalDelta]B]]*(BB[

v + \[CapitalDelta]B] - BB[ii]))*(1/

2)*\[CapitalDelta]B, {v, 0,

ii - \[CapitalDelta]B, \[CapitalDelta]B}],

ZZ[ii] ];];

```

```

Z[ii] = 0;

ii += \[CapitalDelta]B;

ZZ[ii] = 0;

endTReal = ii;

FBi[t_] := \!(\*

TagBox[GridBox[{

{\[Piecwise]", GridBox[{

{

SuperscriptBox["0.1", "Nmax"],

RowBox[{"t", "<", " "},

RowBox[{"0.97", "endTReal"}]}]},

{"1",

RowBox[{"t", ">="},

RowBox[{"0.97", "endTReal"}]}]}

},

AllowedDimensions->{2, Automatic},

Editable->True,

GridBoxAlignment->{

"Columns" -> {{Left}}, "ColumnsIndexed" -> {},

"Rows" -> {{Baseline}}, "RowsIndexed" -> {},

"Items" -> {}, "ItemsIndexed" -> {}},

GridBoxItemSize->{

"Columns" -> {{Automatic}}, "ColumnsIndexed" -> {},

"Rows" -> {{1.}}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {},

"ItemsIndexed" -> {}},

GridBoxSpacings->{"Columns" -> {

Offset[0.27999999999999997], {

```

```

Offset[0.84]},
Offset[0.2799999999999997]}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {
Offset[0.2], {
Offset[0.4]},
Offset[0.2]}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {},
    "ItemsIndexed" -> {}},
Selectable->True]}
},
GridBoxAlignment->{
    "Columns" -> {{Left}}, "ColumnsIndexed" -> {},
    "Rows" -> {{Baseline}}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {},
    "ItemsIndexed" -> {}},
GridBoxItemSize->{
    "Columns" -> {{Automatic}}, "ColumnsIndexed" -> {},
    "Rows" -> {{1.}}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {},
    "ItemsIndexed" -> {}},
GridBoxSpacings->{"Columns" -> {
Offset[0.2799999999999997]}, {
Offset[0.35]},
Offset[0.2799999999999997]}, "ColumnsIndexed" -> {}, "Rows" -> {
Offset[0.2], {
Offset[0.4]},
Offset[0.2]}, "RowsIndexed" -> {}, "Items" -> {},
    "ItemsIndexed" -> {}},
"Pieewise",
DeleteWithContents->True,
Editable->False,

```



```

SelectWithContents->True,

Selectable->False,

StripWrapperBoxes->True]);

ENLoS =

Table[(E^(muBi[i] ((2 rBl)/vBl) ) - 1)/muBi[i], {i, 1, Nmax}];

ClearAll[TLiWOMM];

TLiWOMM = List[];

For[i = 1, i <= Nmax, i++,

AppendTo[TLiWOMM, NIntegrate[x fTLi[[i]][x], {x, 0, 100}]]];

Pi0 = Table[

NIntegrate[fTAEExp[x] (1 - FTLi[[i]][x]), {x, 0, 100}], {i, 1,

Nmax}];

ClearAll[UMatrWMM, IMatrWMM, DMatrWMM, DMatrixWMM, \[Pi]vecWMM];

\[Pi]vecWMM = Table[0, {i, 1, 3 Nmax}];

For[i = 1, i <= Nmax, i++, \[Pi]vecWMM[[i]] = Ti[[i]]/Total[Ti]];

UMatrWMM = Table[0, {i, 1, 3 Nmax}, {j, 1, 3 Nmax}];

For[i = 1, i <= Nmax, i++, {UMatrWMM[[i, Nmax + i]] = (1 - Pi0[[i]]);

UMatrWMM[[i, 2 Nmax + i]] = Pi0[[i]];

For[j = 1, j <= Nmax, j++, {

If[i != j, UMatrWMM[[Nmax + i, j]] = (1 - PNi[j]) \!\(

\*UnderoverscriptBox[\(\[Product]\), \(\(k = 1\), \(\(j - 1\)\)\](If[

k != i, PNi[k], 1]\)\), UMatrWMM[[Nmax + i, j]] = 0];

If[i != j,

UMatrWMM[[2 Nmax + i, j]] = If[j < i, (1 - PNi[j]) \!\(

\*UnderoverscriptBox[\(\[Product]\), \(\(k = 1\), \(\(j - 1\)\)\](PNi[k]\)\), 0) , UMatrWMM[[2 Nmax + i, j]]

= \!\(

\*UnderoverscriptBox[\(\[Product]\), \(\(k = 1\), \(\(j - 1\)\)\](PNi[k]\)\)}];};};

IMatrWMM = DiagonalMatrix[Table[1, {i, 1, 3 Nmax}]] ;

```

```

DMatrWMM = Table[0, {i, 1, 3 Nmax}, {j, 1, 3 Nmax}];

DMatrWMM = IMatrWMM - UMatrWMM;

DMatrixWMM = Inverse[DMatrWMM];

TNLWMM = (1/ 1.1^(Nmax - 1)) \(\
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\i = 1\), \(\Nmax\)]\(\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\[j]\)] \
ENLoS[\(\[i]\)\(\[j]\)]\));

beamSearchTWMM = \!\(
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\i = 1\), \(\3
Nmax\)]\(\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\[j]\)]\ TB \(\
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\j =
Nmax + 1\), \(\3\ Nmax\)]DMatrixWMM[\(\[i]\)\(\j\)\(\[j]\)] -
1)\)\)\);

ELWMM = beamSearchTWMM + \!\(
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\i = 1\), \(\3
Nmax\)]\(\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\[j]\)] \(\
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\j = Nmax + 1\), \(\2
Nmax\)]DMatrixWMM[\(\[i]\)\(\i,
j\)\(\[j]\)]\ meanBL[\(\[i]\)\(\j - Nmax\)\(\[j]\)]\)\)\);

outageProbaWMM = ( TNLWMM + beamSearchTWMM)/(TNLWMM + ELWMM);

meanCapaWMM = ((ELWMM - beamSearchTWMM)/(TNLWMM + ELWMM)) \!\(
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\i = 1\), \(\3\ Nmax\)]\(\If[\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\[j]\)] > 0,
\(\(\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\[j]\)]\)\^
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\j = 1\), \(\Nmax\)]DMatrixWMM[\(\[i]\)\(\j\)\(\[j]\)]\)\)\)\(
\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\j = 1\), \(\Nmax\)]DMatrixWMM[\(\[i]\)\(\i, j\)\(\[j]\)]\
Ec[\(\[i]\)\(\j\)\(\[j]\)]\), 0]\)\);

meanPassageNumber = Table[\!\(\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\j = 1\),
\(\Nmax\)]\(\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\j\)\(\[j]\)]\ DMatrixWMM[\(\[i]\)\(\j, i\)\(\[j]\)]\), {i, 1, Nmax}\};

meanBlockageNumber = Table[\!\(\*UnderoverscriptBox[\(\[Sum]\), \(\j = 1\),
\(\Nmax\)]\(\[Pi]vecWMM[\(\[i]\)\(\j\)\(\[j]\)]\ DMatrixWMM[\(\[i]\)\(\j, i + Nmax\)\(\[j]\)]\), {i, 1, Nmax}\};

```

meanBeamMisalignmentNumber = Table[$\sum_{j=2}^{N_{\max}+1} \frac{1}{3N_{\max}}$ $\vec{WMM}[\vec{j} - 2, N_{\max}]$ $\text{DMatrixWMM}[\vec{j} - 2, N_{\max}, i + 2, N_{\max}]$], {i, 1, Nmax};

meanAssociationTime = Table[0, {i, 1, Nmax}];

AssociationProb = Table[0, {i, 1, Nmax}];

MeanPowerConsumption = Table[0, {i, 1, Nmax}];

OutageDueSleep = Table[0, {i, 1, Nmax}];

MeanActiveTime = Table[0, {i, 1, Nmax}];

Π CSS = Table[0, {i, 1, Nmax}];

Π CLS = Table[0, {i, 1, Nmax}];

Π ISS = Table[0, {i, 1, Nmax}];

Π ILS = Table[0, {i, 1, Nmax}];

TILS = Table[0, {i, 1, Nmax}];

fC = Table[With[{i = i}, fTAEExp[#] (1 - FTLi[[i]][#]) + fTLi[[i]][#] (1 - FTAEExp[#]) &], {i, 1, Nmax}];

For[n = 1, n <= Nmax, n++, {tCSSn = tCSS ; tCLSn = tCLS ; tISSn = tISS ; tILSn = tILS ; TILS[[n]] = tILSn;

PCvecDRX = EvecDRX { tInactivity, tCSSn, tOn, tCLSn, tOn, tISSn, tOn, tILSn, tOn};

meanAssociationTime[[n]] = NIntegrate[x fC[[n]][x], {x, 0, 100}];

WMatrCSC = Table[0, {i, 1, 2 nCSS + 1}, {j, 1, 2 nCSS + 1}];

WMatrCSC[[1, 1]] = Exp[-[Lambda]O (tInactivity + tOn)] NIntegrate[fC[[n]][y], {y, tInactivity + tOn, 100}];

WMatrCSC[[1, 2]] = (1 - Exp[-[Lambda]O (tInactivity + tOn)]) NIntegrate[fC[[n]][y], {y, tInactivity + tOn, 100}];

WMatrCSC[[2, 3]] = 1;

WMatrCSC[[3, 1]] = (1 - Exp[-[Lambda]S (tCSSn)]) NIntegrate[fC[[n]][y], {y, tCSSn, 100}];

For[iCSS = 2, iCSS <= nCSS, iCSS++, {WMatrCSC[[2 iCSS - 1, 2 iCSS]] = (Exp[-[Lambda]S (iCSS tCSSn)]) NIntegrate[fC[[n]][y], {y, iCSS tCSSn, 100}];

WMatrCSC[[2 iCSS, 2 iCSS + 1]] = 1;

WMatrCSC[[2 iCSS + 1, 1]] = (1 - Exp[-[Lambda]S (iCSS tCSSn)]) NIntegrate[fC[[n]][y], {y, iCSS tCSSn, 100}];

IMatrCSC = DiagonalMatrix[Table[1, {i, 1, 2 nCSS + 1}]] ;

$DMatrCSC = Table[0, \{i, 1, 2 nCSS + 1\}, \{j, 1, 2 nCSS + 1\}];$
 $DMatrCSC = IMatrCSC - WMatrCSC;$
 $DMatrixCSC = Inverse[DMatrCSC];$
 $pCLC = DMatrixCSC[[1, 2 nCSS + 1]]/(\text{UnderoverscriptBox}[\text{Sum}], \{i = 1\}, \{nCSS\})(DMatrixCSC[\text{Sum}](1, 2 i + 1)(\text{Sum}));$
 $WMatrCLC = Table[0, \{i, 1, 2 nCLS + 3\}, \{j, 1, 2 nCLS + 3\}];$
 $WMatrCLC[[1, 1]] = Exp[-\text{Lambda}O (tInactivity + tOn)] NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, tInactivity + tOn, 100\}];$
 $WMatrCLC[[1, 2]] = (1 - Exp[-\text{Lambda}O (tInactivity + tOn)]) NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, tInactivity + tOn, 100\}];$
 $WMatrCLC[[2, 3]] = 1;$
 $WMatrCLC[[3, 1]] = (1 - Exp[-\text{Lambda}S (tCSSn)]) NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, tCSSn, 100\}];$
 $WMatrCLC[[3, 2]] = (1 - pCLC) Exp[-\text{Lambda}S tCSSn] NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, tCSSn, 100\}];$
 $WMatrCLC[[3, 4]] = (pCLC) Exp[-\text{Lambda}S tCSSn] NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, tCSSn, 100\}];$
 $WMatrCLC[[4, 5]] = 1;$
 $WMatrCLC[[5, 1]] = (1 - Exp[-\text{Lambda}S (tCLS n)]) NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, tCLS n, 100\}];$
 $For[iCLS = 2, iCLS <= nCLS, iCLS++, \{WMatrCLC[[2 + 2 iCLS - 1, 2 + 2 iCLS]] = (Exp[-\text{Lambda}S (iCLS tCLS n)]) NIntegrate[fC[[n]][y], \{y, iCLS tCLS n, 100\}];$
 $WMatrCLC[[2 + 2 iCLS, 2 + 2 iCLS + 1]] = 1;$
 $WMatrCLC[[2 + 2 iCLS + 1, 1]] = (1 - Exp[-\text{Lambda}S (iCLS tCLS n)]) NIntegrate[$
 $fC[[n]][y], \{y, iCLS tCLS n, 100\}];];$
 $IMatrCLC = DiagonalMatrix[Table[1, \{i, 1, 2 nCLS + 3\}]] ;$
 $DMatrCLC = Table[0, \{i, 1, 2 nCLS + 3\}, \{j, 1, 2 nCLS + 3\}];$
 $DMatrCLC = IMatrCLC - WMatrCLC;$
 $DMatrixCLC = Inverse[DMatrCLC];$
 $pISC = DMatrixCLC[[1, 2 nCLS + 3]]/(\text{UnderoverscriptBox}[\text{Sum}], \{i = 1\}, \{nCLS\})(DMatrixCLC[\text{Sum}](1, 2 i + 3)(\text{Sum}));$
 $WMatrISC = Table[0, \{i, 1, 2 nISS + 5\}, \{j, 1, 2 nISS + 5\}];$
 $WMatrISC[[1, 1]] =$

$$\text{Exp}[-\lambda O(t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}})] \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[1, 2]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda O(t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[2, 3]] = 1;$$

$$\text{WMatrISC}[[3, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CSSn}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CSSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[3, 2]] = (1 - p_{\text{CLC}}) \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CSSn}})] \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CSSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[3, 4]] = p_{\text{CLC}} \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CSSn}})] \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CSSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[4, 5]] = 1;$$

$$\text{WMatrISC}[[5, 4]] = (1 - p_{\text{ISC}}) \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CLSn}})] \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CLSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[5, 6]] = p_{\text{ISC}} \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CLSn}})] \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CLSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[5, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CLSn}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CLSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatrISC}[[6, 7]] = 1;$$

$$\text{WMatrISC}[[7, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{ISSn}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{ISSn}}, 100\};$$

For $i_{\text{ISC}} = 2, i_{\text{ISC}} \leq n_{\text{ISS}}, i_{\text{ISC}}++$, $\{\text{WMatrISC}[[4 + 2 i_{\text{ISC}} - 1, 4 + 2 i_{\text{ISC}}]] = (\text{Exp}[-\lambda S(i_{\text{ISC}} t_{\text{ISSn}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, i_{\text{ISC}} t_{\text{ISSn}}, 100\};$

$$\text{WMatrISC}[[4 + 2 i_{\text{ISC}}, 4 + 2 i_{\text{ISC}} + 1]] = 1;$$

$$\text{WMatrISC}[[4 + 2 i_{\text{ISC}} + 1, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S(i_{\text{ISC}} t_{\text{ISSn}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, i_{\text{ISC}} t_{\text{ISSn}}, 100\};$$

$$\text{IMatrISC} = \text{DiagonalMatrix}[\text{Table}[1, \{i, 1, 2 n_{\text{ISS}} + 5\}]] ;$$

$$\text{DMatrISC} = \text{Table}[0, \{i, 1, 2 n_{\text{ISS}} + 5\}, \{j, 1, 2 n_{\text{ISS}} + 5\}];$$

$$\text{DMatrISC} = \text{IMatrISC} - \text{WMatrISC}; \text{DMatrixISC} = \text{Inverse}[\text{DMatrISC}];$$

$$p_{\text{ILC}} = \text{DMatrixISC}[[1, 2 n_{\text{ISS}} + 5]] / (\sum_{i=1}^{n_{\text{ISS}}} (\text{DMatrixISC}[(1, 2 i + 5)]));$$

$$\text{WMatr} = \text{Table}[0, \{i, 1, 9\}, \{j, 1, 9\}];$$

$$\text{WMatr}[[1, 1]] = \text{Exp}[-\lambda O(t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}})] \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}}, 100\};$$

$$\text{WMatr}[[1, 2]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda O(t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{Inactivity}} + t_{\text{On}}, 100\};$$

$$\text{WMatr}[[2, 3]] = 1;$$

$$\text{WMatr}[[3, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S(t_{\text{CSSn}})]) \text{NIntegrate}[fC[[n]][y], \{y, t_{\text{CSSn}}, 100\};$$

$$\text{WMatr}[[3, 2]] = (1 - p_{\text{CLC}}) \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tCSSn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tCSSn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[3, 4]] = p_{\text{CLC}} \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tCSSn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tCSSn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[4, 5]] = 1;$$

$$\text{WMatr}[[5, 4]] = (1 - p_{\text{ISC}}) \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tCLSsn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tCLSsn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[5, 6]] = p_{\text{ISC}} \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tCLSsn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tCLSsn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[5, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tCLSsn}}]) \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tCLSsn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[6, 7]] = 1;$$

$$\text{WMatr}[[7, 6]] = (1 - p_{\text{ILC}}) \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tISSn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tISSn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[7, 8]] = p_{\text{ILC}} \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tISSn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tISSn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[7, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tISSn}}]) \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tISSn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[8, 9]] = 1;$$

$$\text{WMatr}[[9, 8]] = \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tILSn}}] \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tILSn}, 100\}];$$

$$\text{WMatr}[[9, 1]] = (1 - \text{Exp}[-\lambda S_{\text{tILSn}}]) \text{NIntegrate}[f_{\text{C}}[[n]][y], \{y, \text{tILSn}, 100\}];$$

$$\text{IMatr9} = \text{DiagonalMatrix}[\text{Table}[1, \{i, 1, 9\}]];$$

$$\text{DMatr} = \text{Table}[0, \{i, 1, 9\}, \{j, 1, 9\}]; \text{DMatr} = \text{IMatr9} - \text{WMatr};$$

$$\text{DMatrix} = \text{Inverse}[\text{DMatr}];$$

$$\text{MeanPowerConsumption}[[n]] = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \text{DMatrix}[[i, j]] \cdot \text{PCvecDRX}[[j]] \right);$$

$$\begin{aligned} \text{MeanActiveTime}[[n]] &= t_{\text{inactivity}} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \text{DMatrix}[[i, j]] \right); \\ \text{Min}[t_{\text{CSSn}}/\text{meanAssociationTime}[[n]], 1] &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \text{DMatrix}[[i, j]] \right); \\ \text{Min}[t_{\text{CLSsn}}/\text{meanAssociationTime}[[n]], 1] &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \text{DMatrix}[[i, j]] \right); \\ \text{Min}[t_{\text{ISSn}}/\text{meanAssociationTime}[[n]], 1] &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \text{DMatrix}[[i, j]] \right); \\ \text{Min}[t_{\text{ILSn}}/\text{meanAssociationTime}[[n]], 1] &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \text{DMatrix}[[i, j]] \right); \end{aligned}$$

$$\text{AssociationProb}[[n]] = (1 - \text{PNi}[n]) \prod_{i=1}^n (\text{PNi}[i]);$$

$$\text{OutageDueSleep}[[n]] = (\text{DMatrix}[[9, 3]] \text{WMatr}[[3, 1]] t_{\text{CSSn}} + \text{DMatrix}[[9, 5]] \text{WMatr}[[5, 1]] t_{\text{CLSsn}} + \text{DMatrix}[[9, 7]] \text{WMatr}[[7, 1]] t_{\text{ISSn}} + \text{DMatrix}[[9, 9]] \text{WMatr}[[9, 1]] t_{\text{ILSn}}) / (2 \text{meanAssociationTime}[[n]]);$$

$$\text{ActivePowerConsumption} = (\text{meanPassageNumber} \cdot \text{MeanPowerConsumption});$$

ConnectionEstablishmentPowerConsumption = Total[meanBlockageNumber] (ERACH + ESSB + BFICounter EvecDRX[[3]]);

BeamAlignmentPowerConsumption = Total[meanBeamMisalignmentNumber] (ERACH + ESSB + BFICounter EvecDRX[[3]]);

TotalPowerConsumption=ActivePowerConsumption+ ConnectionEstablishmentPowerConsumption + BeamAlignmentPowerConsumption;

BSSelectionProb = Table[meanPassageNumber[[i]] / Total[meanPassageNumber], {i, 1, Nmax}];

meanDelay = (1/2) (PN ((2 rBI)/vBI) + $\sum_{j=1}^{Nmax} \frac{AssociationProb[(j)]}{(1 - MeanActiveTime[(j)])}$

meanAssociationTime[(j)] $\frac{(\sum_{i=1}^N [Pi]CSS[(j)] + \sum_{i=1}^N [Pi]CLS[(j)] + \sum_{i=1}^N [Pi]ISS[(j)] + \sum_{i=1}^N [Pi]ILS[(j)] + BFICounter (\sum_{i=1}^N [Pi]CSS[(j)] (1 - Total[WMatr[(3)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]CLS[(j)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ISS[(j)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ILS[(j)] (1 - Total[WMatr[(9)]]))))}{(1 - Total[WMatr[(3)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]CLS[(j)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ISS[(j)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ILS[(j)] (1 - Total[WMatr[(9)]])}$);

OutageDueDelay = pOperation ((meanBlockageNumber + meanBeamMisalignmentNumber).TILS)/(2 ELWMM) + $\sum_{j=1}^{Nmax} \frac{AssociationProb[(j)]}{(1 - Total[WMatr[(3)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]CLS[(j)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ISS[(j)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ILS[(j)] (1 - Total[WMatr[(9)]])}$);

OutageDueSleep[(j)]);

BackupPowerConsumption = $\sum_{i=1}^{Nmax} \frac{EvecDRX[(3)]}{(ELWMM + TILS[(i)] + tOn)} (1 - PNi[i])$

$\sum_{j=1}^{Nmax} \frac{AssociationProb[(j)]}{(1 - Total[WMatr[(3)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]CLS[(j)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ISS[(j)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ILS[(j)] (1 - Total[WMatr[(9)]])}$

$\sum_{i=1}^{Nmax} \frac{EvecDRX[(3)]}{(ELWMM + TILS[(i)] + tOn)} (1 - PNi[i])$

$\sum_{i=1}^{Nmax} \frac{AssociationProb[(i)]}{(1 - Total[WMatr[(3)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]CLS[(i)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]ISS[(i)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]ILS[(i)] (1 - Total[WMatr[(9)]])}$

$\sum_{k=1}^N [Pnk]CLS[(i)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]ISS[(i)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]ILS[(i)] (1 - Total[WMatr[(9)]])$

$\sum_{j=1}^{Nmax} \frac{AssociationProb[(j)]}{(1 - Total[WMatr[(3)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]CLS[(j)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ISS[(j)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{i=1}^N [Pi]ILS[(j)] (1 - Total[WMatr[(9)]])}$

$\sum_{k=1}^N [Pnk]CLS[(j)] (1 - Total[WMatr[(5)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]ISS[(j)] (1 - Total[WMatr[(7)]]) + \sum_{k=1}^N [Pnk]ILS[(j)] (1 - Total[WMatr[(9)]])$

AppendTo[MeanDelay, meanDelay];

AppendTo[NoConnectivityProbDueToSleep, OutageDueDelay];

AppendTo[NoConnectivityProbDueToOutage, outageProbaWMM];

AppendTo[PowerConsumptionOverall, TotalPowerConsumption/ELWMM];

AppendTo[PowerConsumptionActive, ActivePowerConsumption/ELWMM];

```
AppendTo[PowerConsumptionBackup, BackupPowerConsumption/ELWMM];
```

```
AppendTo[PowerConsumptionReconnection,
```

```
ConnectionEstablishmentPowerConsumption/ELWMM];
```

```
AppendTo[PowerConsumptionBeamsearching,
```

```
BeamAlignmentPowerConsumption/ELWMM];
```

```
Print["Iteration: ",  $\Delta\lambda$ , " / ", (LoopEnd - LoopStart + 1)/LoopStep];]
```

```
ListLinePlot[ {NoConnectivityProbDueToOutage +  
NoConnectivityProbDueToSleep, NoConnectivityProbDueToOutage,  
NoConnectivityProbDueToSleep}, PlotRange -> {{ $\lambda$  BMin LoopStart,  $\lambda$  BMin  
LoopEnd}, {0, 0.25}}, DataRange -> {{ $\lambda$  BMin LoopStart,  $\lambda$  BMin \LoopEnd},  
GridLines -> Automatic, AspectRatio -> 0.8, PlotMarkers -> {{ "[EmptySquare]", 14},  
{ "[EmptyUpTriangle]", 14}, { "[EmptyDiamond]", 14}}, PlotLegends ->  
Placed[LineLegend[{"Общее влияние", "Отсутствие связи", "Режим сна"}, LegendLayout ->  
{"Column", 1}, LegendFunction -> Frame, Background -> White, LabelStyle -> Directive[FontSize -  
> 13]], {0.35, 0.7}], PlotStyle -> {{RGBColor[0.55, .7, 0.3], Thick}, {RGBColor[0.2, .55, 0.8],  
Thick}, {RGBColor[0.85, .35, 0.12], Thick}, {RGBColor[0.5, .25, 0.5], Thick}}, TicksStyle ->  
Directive[18], AxesOrigin -> {0, 0}, FrameLabel -> {Style["Интенсивность блокаторов,  
 $\lambda$  ( $\lambda$ ), B), ед. ( $\lambda$ ), (2)], Black, 14},  
Style["Доля времени простоя", Black, 14]}, Frame -> True, LabelStyle -> Directive[FontSize -> 15]]
```

```
ListLinePlot[ {PowerConsumptionActive, PowerConsumptionReconnection, PowerConsumptionBeam  
searching, PowerConsumptionBackup}, PlotRange -> {{ $\lambda$  BMin LoopStart,  $\lambda$  BMin  
LoopEnd}, {0, 600}}, DataRange -> {{ $\lambda$  BMin LoopStart,  $\lambda$  BMin \LoopEnd},  
GridLines -> Automatic, AspectRatio -> 0.8, PlotMarkers -> {{ "[EmptySquare]", 14},  
{ "[EmptyUpTriangle]", 14}, { "[EmptyDiamond]", 14}, { "[EmptySmallCircle]", 14}}, PlotLegends  
-> Placed[LineLegend[{"Активный канал", "Переключение", "Поиск луча", "Резервный канал"},  
LegendLayout -> {"Column", 2}, LegendFunction -> Frame, Background -> White, LabelStyle ->  
Directive[FontSize -> 13]], {0.51, 0.87}], PlotStyle -> {{RGBColor[0.55, .7, 0.3], Thick},  
{RGBColor[0.2, .55, 0.8], Thick}, {RGBColor[0.85, .35, 0.12], Thick}, {RGBColor[0.5, .25, 0.5],  
Thick}}, TicksStyle -> Directive[18], AxesOrigin -> {0, 0}, FrameLabel -> {Style["Интенсивность  
блокаторов,  $\lambda$  ( $\lambda$ ), B), ед. ( $\lambda$ ), (2)], Black,  
14}, Style["Энергопотребление, МВт", Black, 14]}, Frame -> True, LabelStyle -> Directive[FontSize  
-> 15]]
```