

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»**

На правах рукописи

Бесчастный Виталий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА В БЕСПРОВОДНЫХ МОБИЛЬНЫХ
СЕТЯХ С МНОГОАДРЕСНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ**

Специальность 05.13.17 – теоретические основы информатики

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
доцент Гайдамака Юлия Васильевна

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ.....	13
1.1. Подходы к построению моделей расположения пользователей с использованием теории точечных процессов.....	13
1.2. Модель для анализа задержек в сети колесных транспортных средств .	19
1.3. Обзор принципов мультивещания и постановка задачи исследований .	34
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА ПО МОБИЛЬНОЙ СЕТИ МУЛЬТИВЕЩАНИЯ.....	38
2.1. Особенности мультимедийных услуг с многоадресной передачей данных.....	38
2.2. Построение модели расположения пользователей для анализа суммарной скорости передачи в сети с многоадресной передачей.....	42
2.3. Анализ вероятностных характеристик и задача оптимизации схемы распределения радиоресурсов	49
ГЛАВА 3 МОДЕЛЬ РЕСУРСНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА ОДНОАДРЕСНЫХ И МНОГОАДРЕСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	63
3.1. Системная модель блокировки прямой видимости в высокочастотной сети	63
3.2. Построение модели обслуживания одноадресных соединений и итерационный метод расчета вероятностных характеристик.....	72
3.3. Имитационная модель и численный анализ	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	88
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. С каждым годом потребности пользователей увеличиваются, а также увеличивается количество подключений устройств к сети. По прогнозам экспертов, только мобильный видеотрафик будет расти ежегодно на пятьдесят процентов [34]. Эта тенденция сохранится вплоть до 2022 года. Так же увеличивается количество устройств, работающих по принципу M2M (англ. Machine-to-Machine, межмашинное взаимодействие). Для таких устройств постоянное внимание человека не обязательно, что позволяет таким устройствам работать непрерывно [14].

В связи с ростом популярности многофункциональных мультимедийных приложений и услуг, беспроводные мобильные сети должны постоянно развиваться, предлагая более высокие скорости передачи данных, а также снижение задержки передачи данных и рост энергоэффективности, что приводит к повышению качества обслуживания конечных пользователей [71]. В процессе развития технологии мобильной связи следующего поколения, известной как 3GPP LTE (англ. Long Term Evolution), предназначенной для значительного увеличения пропускной способности и охвата широкополосной связи, предпринимаются решительные шаги во многих аспектах проектирования систем беспроводной связи. При этом, в вопросах роста емкости, многие сходятся во мнении, что единственным жизнеспособным решением является более плотная организация меньших по размеру сот [79].

Мобильная связь — это передача данных через радиоволны на разных частотах. Чем выше частоты, тем меньше длина волны. Миллиметровый диапазон обычно определяют частотами от 30 GHz до 300 GHz. Миллиметровые волны (mmWave) обещает большую "плотность" передачи данных, по сравнению с той, что доступна сегодня [29, 95]. Переход на миллиметровый диапазон позволит на порядки (то есть в десятки и сотни раз) увеличить скорость передачи данных по сравнению с LTE.

Сокращение размеров сот, действительно, дает преимущества для сети,

приближая сотовую инфраструктуру к конечным пользователям и, таким образом, увеличивая их достижимые скорости передачи данных. Однако продолжающееся уплотнение сети также требует новых методов оценки производительности, с учетом специфики плотных гетерогенных сетей.

Для отслеживания передвижений пользователей требуется новый взгляд на моделирование сети в целом, — это более сложная задача, чем рассмотрение набора неактивных пользователей, зафиксированных в некотором положении [49]. Сложность моделирования подтверждается и тем фактом, что современные мобильные системы предлагают очень высокую степень детализации при распределении ресурсов (с соответствующей единицей частотно-временного деления, известной, как ресурсный блок). Действительно, при чрезвычайно большом количестве ресурсных блоков, доступных для выделения, процесс управления радиоресурсами можно рассматривать как непрерывный [57], что приводит к неэффективности существующих дискретных моделей.

Помимо архитектурных решений, в современных сетях необходимы методы повышения спектральной эффективности, без применения которых использование более широкого спектра частот не даст ожидаемого результата [85]. Во многих работах исследуются «расширенные» мультимедийные широковещательные услуги (англ. enhanced Multimedia Broadcast Multicast Services, eMBMS) [90] как технология управления мобильным видеотрафиком в сетях мобильной связи. В частности, исследования, связанные с беспроводным доступом, передачей данных в сети, механизмами распределения нагрузки трафика, являются одними из основных направлений исследований для eMBMS [5, 16]. Тем не менее, большинство исследований, проведенных до сих пор в области будущих 5G технологий, основаны на статических сценариях, в которых состояние канала связи у конечных пользователей не меняется с течением времени. Несмотря на то, что модели движения при анализе технологий одноадресных соединений часто исследуются как отдельные задачи, их значимость для многоадресных систем 5G изучено в гораздо меньшей степени.

Вместе с ростом нагрузки мультимедийного трафика беспроводные сотовые сети должны постоянно развиваться, обеспечивая более высокие скорости передачи данных, меньшие задержки передачи и лучшее качество обслуживания для конечных пользователей. Однако требования пользователей растут даже быстрее, чем возможности сети. Следовательно, сетевые операторы нуждаются в эффективных инструментах оценки производительности, которые учитывают важнейшие особенности современных сотовых сетей.

Ввиду изложенного, в диссертации актуальной задачей является построение моделей массового обслуживания и разработка новых методов исследования вероятностно-временных характеристик перспективных телекоммуникационных систем. Более того, анализ источников, рекомендаций и стандартов международных организаций, таких как 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project), IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers), ETSI (англ. European Telecommunications Standards Institute), показал необходимость в комплексных моделях, которые бы адекватно описывали особенности методов управления доступом и распределением ресурсов в сетях пятого и последующих поколений.

Таким образом, диссертация включает исследование трех основных задач:

1. анализ методов распределения ресурсов сети при обслуживании трафика мобильных пользователей;
2. модель расположения пользователей в беспроводной сети с трафиком многоадресных соединений и выделением подгрупп;
3. модель базовой станции высокочастотной сети с блокировками и переключением пользователей на соседние станции.

Именно эти задачи решаются в диссертационной работе и поэтому тема исследования является актуальной.

Степень разработанности темы. Для анализа вероятностно-временных характеристик (ВВХ) многоадресной передачи данных в беспроводных сетях применяются математические модели, основанные на теории вероятностей, теории

массового обслуживания, теории случайных процессов, теории телетрафика и стохастической геометрии. К российским ученым, исследователям, внесшим большой вклад в эти области, относятся Г.П. Башарин [22, 104, 105], П.П. Бочаров [105], В.М. Вишневецкий [114], Ю.В. Гайдамака [22, 45, 59], Б.С. Гольдштейн [115], А.Е. Кучерявый [118], Е.А. Кучерявый [12, 46, 118], А.А. Назаров [123], А.Н. Моисеев [68, 69, 138], С.П. Моисеева [61, 120], В.А. Наумов [73, 79, 89, 124], Д.А. Молчанов [59, 68, 77], А.П. Пшеничников [128], Ю.Н. Орлов [59], В.В. Рыков [129], К.Е. Самуйлов [22, 129], С.Н. Степанов [133, 134, 135], Цитович И.И. [136] и др., а к зарубежным – М. Dohler [38], J.G. Andrews [15], F.P. Kelly [55], M. Haenggi [40, 51], V.B. Iversen [54], L. Kleinrock [116, 117], E. Gelenbe [47], O. Martikainen [64], L.M. Correia [57], K.W. Ross [82] и др. Обзор конкретных работ содержится в главах диссертационной работы по мере изложения решений поставленных задач.

Цель и задачи исследований. Проведенный анализ особенностей систем беспроводных сетей с многоадресной передачей данных позволяет сформулировать цель диссертационного исследования как: построение вероятностных моделей обслуживания мобильных устройств для анализа показателей эффективности и вероятностных методов выделения ресурсов в беспроводных сетях с трафиком многоадресных соединений.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Построение и анализ модели перемещения пользователей в соте беспроводной сети для оптимизации параметров групп мультивещания в виде замкнутой сети массового обслуживания (CeMO).
2. Построение модели обслуживания трафика одноадресных и многоадресных соединений для анализа блокировок в виде ресурсной системы массового обслуживания (СМО) с переменными требованиями к объему занимаемого ресурса.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии из 138 наименований на русском и английском языках.

Научная работа изложена на 108 страницах текста, содержит 38 рисунков и 5 таблиц.

Краткое изложение диссертации. В первой главе работы рассматриваются особенности построения вероятностных моделей обслуживания мобильных устройств в беспроводных сетях, проводится общий обзор методов анализа представленных моделей. В разделе 1.1 рассмотрены основные методы моделирования расположения мобильных пользователей беспроводной сети с использованием теории точечных процессов. Исследованы процессы твердого ядра, позволяющие учитывать пространственные характеристики моделируемых объектов, а также область применения пуассоновских точечных процессов без потери точности по отношению к процессам твёрдого ядра с точки зрения соотношения сигнал шум. В разделе 1.2 проведен анализ зависимости характеристик обслуживания от расположения пользователей на примере модели обслуживания трафика транспортных средств в беспроводных сетях. Раздел 1.3 посвящён исследованию принципов мультивещания, а также формирования групп пользователей для оптимизации характеристик обслуживания пользователей беспроводной сети. При разработке разделов 1.1-1.3 использовались публикации [28, 99, 101, 108] с участием автора.

Вторая глава посвящена построению и анализу модели движения пользователей для нахождения оптимальной конфигурации многоадресных групп. В разделе 2.1 представлен обзор мультимедийных услуг на базе многоадресной передачи данных. В разделе 2.2 представлена и проанализирована модель движения пользователей для нахождения оптимальной конфигурации многоадресных групп. В разделе 2.3 сформулированы задачи оптимизации для распределения ресурсов многоадресным группам пользователей, а также проанализированы вероятностные характеристики многоадресной передачи данных. При разработке разделов 2.1 – 2.3 использовались публикации [25, 27, 28, 127, 130, 132] с участием автора.

В третьей главе построена и проанализирована модель обслуживания

трафика одноадресных и многоадресных соединений в высокочастотной сети. В разделе 3.1 представлено описание физической модели рассматриваемой модели высокочастотной сети. В разделе 3.2 представлена модель базовой станции высокочастотной сети с блокировками и переключением пользователей на соседние станции в виде СМО с переменными требованиями к ресурсам беспроводной сети, а также приведён точный метод расчета вероятностно-временных характеристик (ВВХ) системы, в то числе вероятности потерь и средней доли используемого ресурса. В разделе 3.3 представлен численный анализ показателей эффективности системы с помощью методов дискретно-событийного моделирования. При разработке разделов 3.1 – 3.3 использовались публикации [73, 92, 106, 109, 121, 122].

В заключительном разделе приведены основные результаты диссертационной работы.

Положения, выносимые на защиту.

1. На основе разработанной математической модели, учитывающей распределение пользователей по уровням качества канала, предложен алгоритм разбиения на группы мультивещания для максимизации суммарной скорости передачи.
2. Для оценки вероятностей сброса одноадресных и многоадресных соединений предложена модель ресурсной системы массового обслуживания (СМО) с переменными требованиями к ресурсу и разработана имитационная модель, которые учитывают блокировки подвижными препятствиями прямой видимости между приёмо-передающими устройствами.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Предложена модель расположения пользователей беспроводной сети с многоадресной передачей данных для поиска оптимальной конфигурации многоадресных групп. В отличие от известных ранее, модель учитывает четыре различные стратегии выделения многоадресных групп и распределения ресурсов, а именно:

- 1) максимизация суммарной скорости передачи;
 - 2) минимизация разности между скоростями передачи;
 - 3) максимизация минимальной скорости передачи;
 - 4) пропорциональная справедливость.
2. Построена аналитическая модель базовой станции сети «новое радио» в виде ресурсной СМО, которая в отличие от известных учитывает блокировки прямой видимости и переключение пользователей на соседние станции с помощью обслуживания фазового типа.

Методы исследования. В диссертации применяются методы теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, теории массового обслуживания, математической теории телетрафика, стохастической геометрии и имитационного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты в диссертационной работе могут быть использованы проектными телекоммуникационными компаниями, операторами сетей связи при планировании сетей радиодоступа для оптимизации затрат на установку оборудования при условии предоставления требуемого качества услуг.

Разработанные математические модели могут быть применены при расчете оценок показателей эффективности обслуживания пользователей беспроводных сетей, а именно при проектировании расположения телекоммуникационного оборудования.

Результаты работы включены в исследования по грантам РФФИ № 16-37-00421 «Разработка комплекса марковских моделей для анализа показателей эффективности схем доступа в беспроводных мультисервисных сетях с приоритетным обслуживанием», № 18-37-00380 «Математические модели управления радиоресурсами гетерогенных сетей пятого (5G) поколения в условиях высокой динамики изменения параметров пользовательских сессий».

Реализация результатов работы. Основные научные достижения, полученные в диссертации, использованы в совместных исследовательских

мероприятиях в рамках сотрудничества между РУДН и Технологическим университетом города Тампере (Финляндия), в исследованиях по грантам РФФИ, в проекте «5-100» повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Также результаты диссертационной работы включены в учебный процесс Института прикладной математики и телекоммуникаций Российского университета дружбы народов (РУДН). В частности, модель базовой станции сети «новое радио», учитывающая блокировки прямой видимости между приемо-передающими устройствами и переключение пользователей на соседние базовые станции, используется в учебном процессе в курсе лекций по дисциплине «Современные концепции инфокоммуникаций» для магистров направления 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», специализация «Управление инфокоммуникациями и интеллектуальные системы».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных конференциях и семинарах:

- X Юбилейная Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (г. Москва, ноябрь 2015 г.);
- XIX международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь, DCCN-2017» (г. Москва, ноябрь 2016 г.);
- международная конференция «NEW2AN» (г. Санкт-Петербург, август 2017 г.);
- IX международная конференция по передовым телекоммуникационным технологиям и системам управления «International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems» (г. Мюнхен, Германия, ноябрь 2017 г.);

- XVI международная конференция по численному анализу и прикладной математике «International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics» (Греция, сентябрь 2018 г.);
- XXX международный симпозиум по персональным, мобильными и телекоммуникациям внутри помещений «IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications» (г. Стамбул, Турция, сентябрь 2019 г.);
- XXII международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь, DCCN-2019» (г. Москва, сентябрь 2019 г.).

Основные результаты опубликованы в трудах международных конференций, индексируемых WoS (Web of Science) и Scopus. По материалам исследований в федеральном органе исполнительной власти по интеллектуальной собственности зарегистрированы программы ЭВМ «Анализ модели D2D сети на основе пространственных процессов твердого ядра» [102], «Расчет параметров аппроксимирующих распределений расстояний до ближайших соседей в пространственном процессе твердого ядра» [103], «Расчет вероятностных характеристик дискретной модели с групповым обслуживанием для анализа схемы доступа транспортных средств к ресурсам беспроводной сети» [107], «Расчет средней скорости передачи данных по технологии мультимедиа устройствами межмашинного взаимодействия в беспроводной сети» [110], «Расчет вероятностных характеристик модели обслуживания трафика одноадресных соединений в сети на базе технологии «Новое Радио»» [111], «Расчет вероятностно-временных характеристик модели обслуживания гетерогенного трафика высокочастотной сети с механизмом множественного подключения» [112], «Расчет оптимальной скорости передачи данных в сети с технологией мультимедиа методом перебора» [126], «Расчет средней суммарной скорости передачи данных и оптимального количества подгрупп пользователей в

модели сети с технологией мультимедиа и переменными работающими мобильными устройствами» [131].

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с паспортом специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» и включает оригинальные результаты в области исследования информационных процессов и требований их пользователей к показателям эффективности, в области разработки моделей информационных процессов в сетях с многоадресной передачей, разработки общих принципов организации телекоммуникационных систем и оценки их эффективности. Таким образом, диссертационное исследование соответствует следующим разделам паспорта специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики»:

1. Исследование, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей.
2. Исследования и разработка требований к программно-техническим средствам современных телекоммуникационных систем на базе вычислительной техники.
3. Общие принципы организации телекоммуникационных систем и оценки их эффективности

Личный вклад. Результаты диссертационной работы в области разработок моделей и последующего их анализа получены автором самостоятельно, программные средства разработаны при его непосредственном участии.

Публикации. Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 26 печатных изданиях [25, 26, 27, 28, 73, 75, 92, 99, 100, 101, 102, 103, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 121, 122, 126, 127, 130, 131, 132], из которых издания [106, 109] рекомендованы ВАК РФ, а издания [25, 26, 27, 28, 73, 75, 92] входят в базу данных Scopus.

ГЛАВА 1

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

1.1. Подходы к построению моделей расположения пользователей с использованием теории точечных процессов

Технология мобильного доступа претерпевает революционные изменения каждые десять лет. Каждое новое поколение мобильных технологий приносит значительное повышение производительности сетей связи, а также позволяет предоставлять услуги, невозможные для систем предыдущих поколений. В последнее время столь быстрые изменения происходят в ответ на растущие требования к емкости сетей, вызванные взрывным ростом объемов передаваемых данных, и львиная доля трафика при этом приходится на передачу видеоданных. Используемое разрешение видео также растет, и для телефонов, поддерживающих видео в формате 4К, уже потребуется скорость передачи данных в 15,4 Мбит/с для каждого пользователя (разрешение 4К при 64 кадров в секунду и коэффициента цветности 4: 4: 4). Длительность видео также увеличивается: для пользователей становится вполне обыденным смотреть полнометражные телевизионные программы и фильмы с помощью потокового видео. Очевидно, что в скором времени эта тенденция не изменится и спрос на контент продолжит расти еще большими темпами, опережая даже смелые прогнозы. Ожидается, что к 2021 году глобальный мобильный трафик составит порядка 77,5 экзабайт в месяц [34]. Однако варианты использования технологий 5G не ограничиваются только широкополосной подвижной связью. Фактически, стандарты сетей пятого поколения предназначены для поддержки разнообразных сценариев в трех обширных направлениях [95]:

- Усовершенствованная мобильная широкополосная связь (англ. Enhanced Mobile Broadband, eMBB) – предназначена для ресурсоемких приложений, таких как высокочеткие технологии дистанционного восприятия,

телемедицина и дистанционная хирургия. Увеличение емкости сети может быть достигнуто как за счет методов оптимизации передачи трафика, к которым можно отнести мультивещание, рассмотренное в разделе 1.3, так и за счет увеличения спектра доступных частот (раздел 3.1).

- Ультра-надёжные коммуникации с малым временем задержки (англ. Ultra-Reliable and Low Latency Communications URLLC) – для критически важных услуг, таких как интеллектуальные транспортные сети, здравоохранение, промышленная автоматика. Исследованию данного направления посвящен раздел 1.2, в котором рассматривается модель установления V2X (англ. Vehicle to Anything) соединений.
- Массовые машинные коммуникации (англ. Massive Machine Type Communications, mMTC) – для быстрорастущих, высокообъёмных приложений интернета вещей, среди которых можно назвать такие, например, как смарт-измерения, интеллектуальные здания, умные города и учет материальных ценностей. Несмотря на то, что структура трафика mMTC соединений до сих пор до конца неизвестна, они характеризуются огромным числом передающих устройств с небольшими требованиями к скорости и задержкам. Сами устройства при этом должны быть недорогими и иметь возможность длительной работы от заряда батареи.

Одним из широко используемых методов, применяемых при моделировании расположения приемо-передающих устройств (как базовых станций и точек доступа, так и оборудования пользователей) в беспроводных сетях, являются пространственные процессы (англ. Point Processes) [15, 36]. Пространственный процесс является случайным процессом и представляет собой множество точек, распределенных в некотором n -мерном пространстве. Одно из наилучших приближений к реальным данным позволяет получить процессы твёрдого ядра Матерна (англ. Matern Hardcore Process, МНС), в которых устанавливается некоторое минимально возможное расстояние между произвольной парой устройств. Причем в большинстве случаев МНС II-типа дает лучшее приближение,

чем МНС I-типа [82]. Однако такие процессы очень сложны для анализа, так как практически невозможно получить выражения в аналитическом виде. По этой причине, вместо них применяют хорошо изученные и относительно простые в анализе пуассоновские точечные процессы (англ. Poisson Point Process, PPP) [9, 21].

Рассмотрим фрагмент сети, который представляет собой плоскость с распределенными на ней устройствами (рис. 1.1).

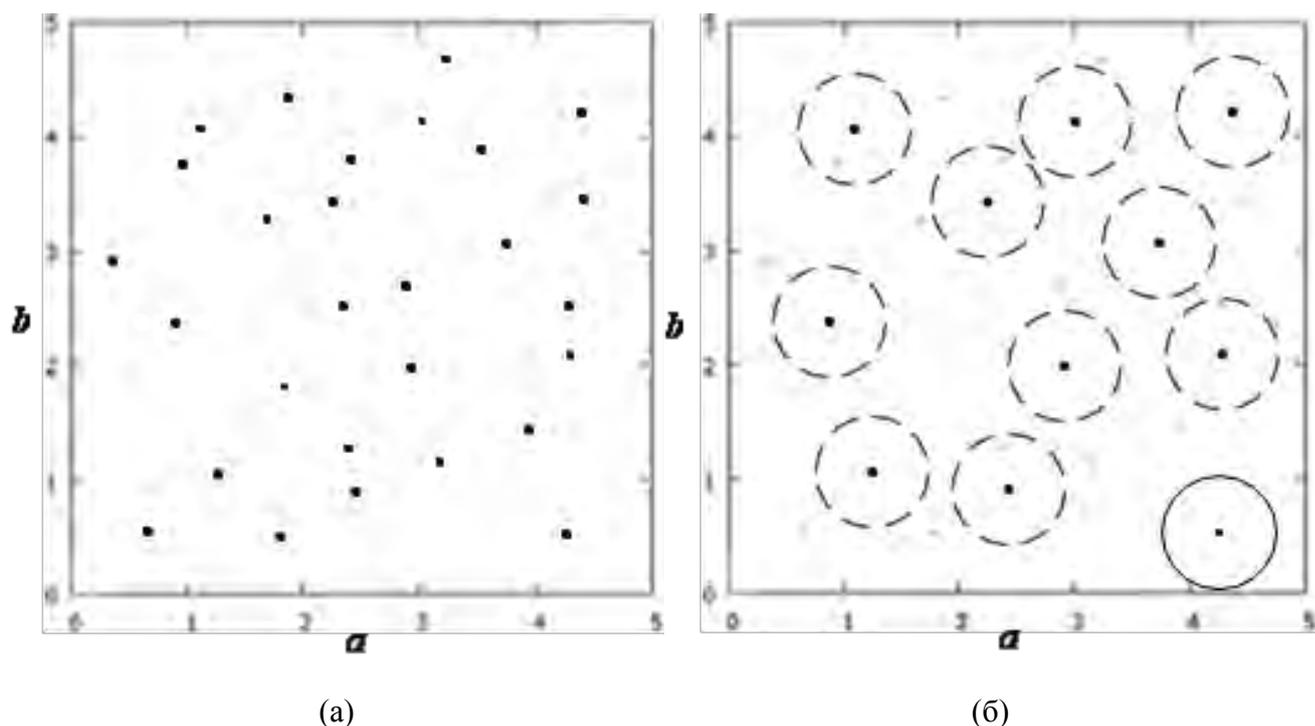


Рис. 1.1. Фрагмент сети с беспроводными устройствами, смоделированный по PPP (а) и МНС (б).

Для простоты будем считать, что на исследуемой плоскости отсутствуют объекты, которые могли бы повлиять на эффект затухания сигнала. Пусть мощность сигнала всех устройств будет равной. В работе рассматривается только сигнал в нисходящем направлении от устройств-источников, которые при установлении соединений могут вызывать явление интерференции. Таким образом, целесообразно рассматривать все устройства в качестве потенциальных источников.

Из представленных выше упрощений можно получить формулу для определения соотношения сигнал/шум (англ. Signal to Interference Ratio, SIR) в виде (1.1) [24]:

$$SIR = \frac{gl_0^{-a}}{g \sum_{i=1}^N l_i^{-a}} = l_0^{-a} * [\sum_{i=1}^N l_i^{-a}]^{-1}. \quad (1.1)$$

где a – показатель затухания сигнала в среде (далее в работе полагается $a = 2$, что соответствует наиболее идеальным условиям), l_0 – расстояние между рассматриваемой парой целевой источник–приемник (ЦИ-П), l_i – расстояние между парами целевой источник–интерферирующий i –источник (ЦИ-ИИ), g – мощность сигнала от источников, $N + 1$ – общее число источников (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Пары ЦИ-П и ЦИ-ИИ.

Как уже ранее отмечалось, наиболее интересным параметром при исследовании взаимодействия беспроводных устройств является SIR, который в общем случае является случайной величиной и меняется в зависимости как от параметров принимающего устройства, так и от момента наблюдения [94]. Из формулы (1.1) видно, что наибольший вклад в уменьшение этого показателя привносят ближайшие устройства, поэтому дальнейшее исследование будет

нацелено на анализ характеристик в контексте именно таких устройств. Для определенности рассмотрим пять наиболее близких пар ЦИ-ИИ.

На рис. 1.3 представлены эмпирические функции плотности распределения расстояний, из которых видно, что отличия в расстояниях, даже в среднем значении, существенны. Результаты показаны для пространственных процессов с интенсивностями $\lambda_{MHC} = \lambda_{PPP} = 1$ ИИ / м², параметром МНС-процесса $r = 1$.

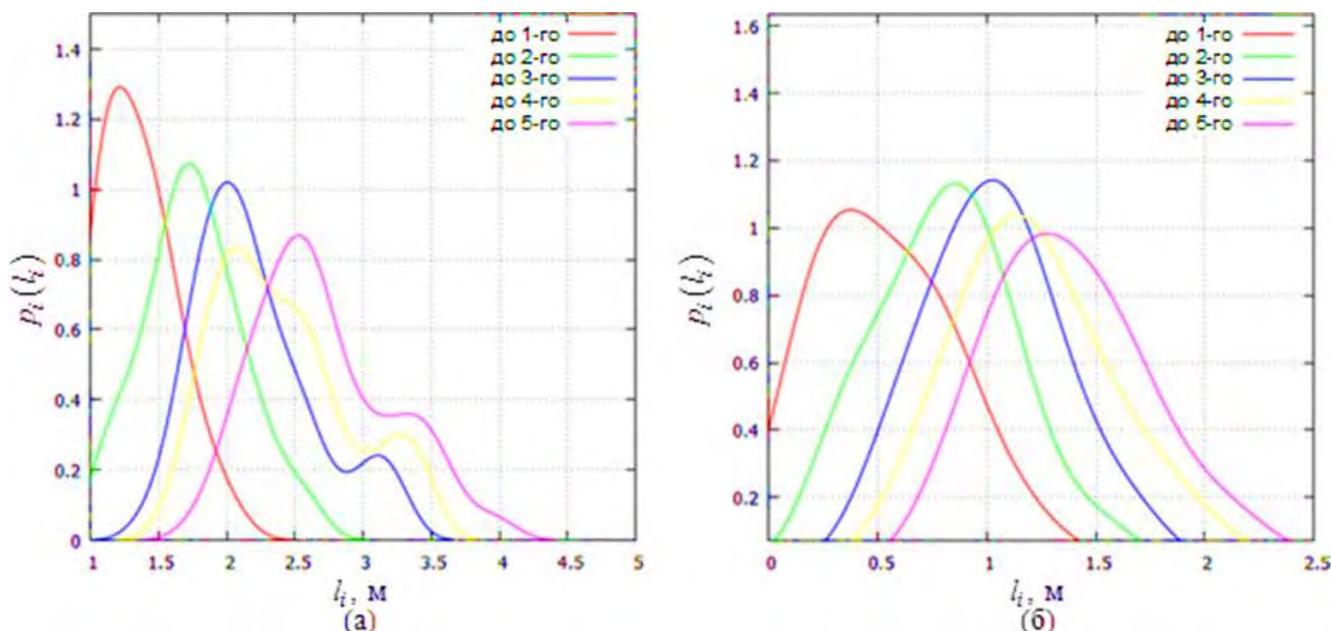


Рис. 1.3. Эмпирические функции плотности распределения расстояний до ближайших пяти ИИ при (а) МНС П, (б) PPP.

На рис. 1.4 представлены эмпирические функции распределения и функция плотности SIR для пары ЦИ-П, где источник находится в трех положениях:

$$l_0 \in \left\{ \frac{1}{4}r; \frac{1}{2}r; \frac{3}{4}r \right\}. \text{ Параметры моделирования аналогичны.}$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в терминах SIR погрешность при переходе между процессами усугубляется еще больше [100].

При этом возникает вопрос, можно ли при некоторых исходных параметрах использовать PPP вместо МНС. Для этого воспользуемся критерием Фишера равенства выборочных дисперсий SIR [119]. В случае, если критерий Фишера выполняется при некотором наборе исходных параметров, переход между процессами не приведет к значительной погрешности. В случае, если критерий не

выполняется, переход приведет к резкому ухудшению приближенности моделируемых процессов к реальным.

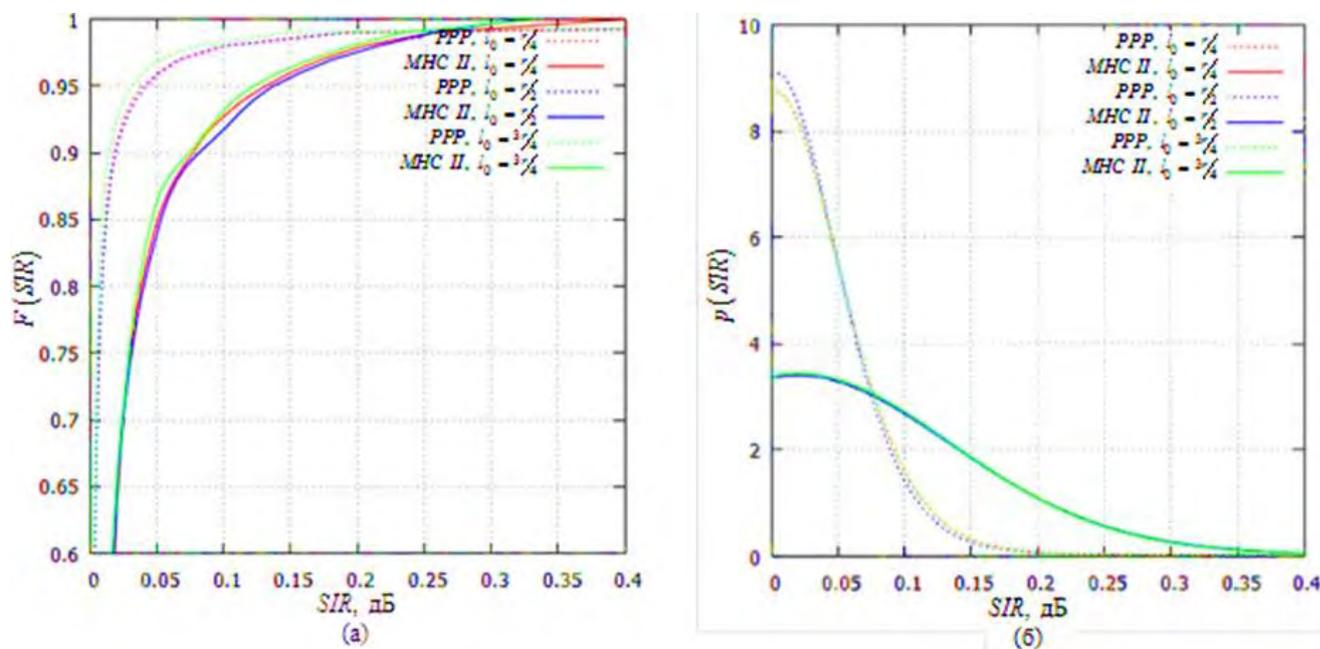


Рис. 1.4. Эмпирические функция распределения (а) и функция плотности (б) SIR для ЦИ-П.

На рис. 1.5 в качестве примера представлена диаграмма, где обозначена область (зона 1) значений параметров, на которых критерий выполняется полностью. В зонах 2 и 3 критерий не выполняется только для не более чем двух и четырёх ближайших пар ЦИ-ИИ соответственно. Стоит отметить, что на рис. 1.5 по оси абсцисс отложены значения параметра $y = \frac{r}{S}$, где S – это площадь исследуемого фрагмента сети. Несложно показать, что при выполнении этого соотношения, результаты являются действительными для любых плоскостей выпуклой формы. Исключением являются слишком малые плоскости, площадь которых не позволяет разместить статистически достаточное число устройств (приблизительно менее 25 кв. м).

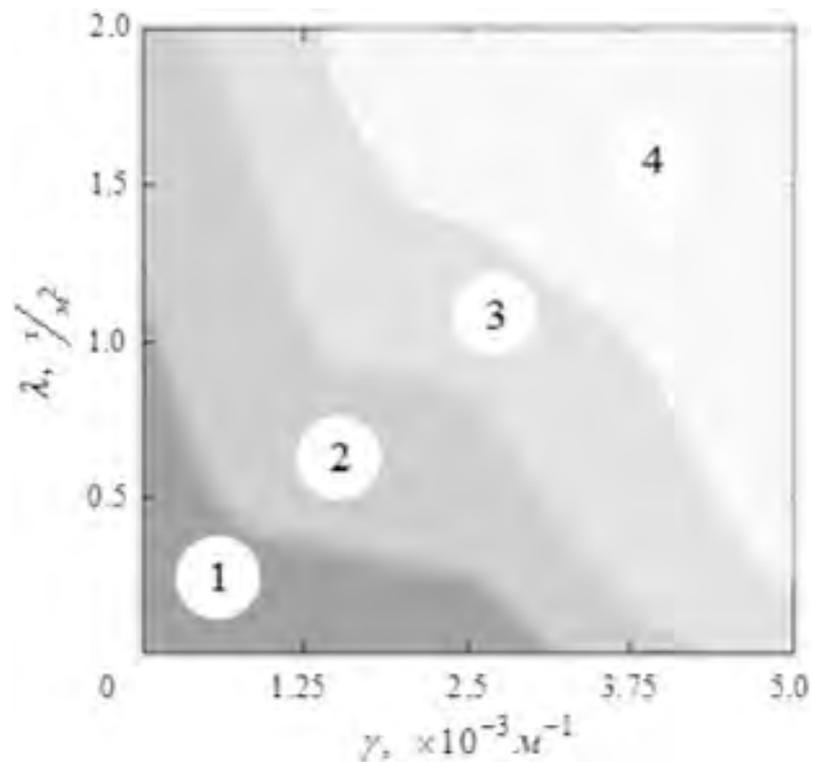


Рис. 1.5. Критерий Фишера равенства выборочных дисперсий SIR.

1.2. Модель для анализа задержек в сети колесных транспортных средств

В данном разделе рассматриваются характеристики процесса обслуживания в мобильной сети в зависимости от расположения устройств на примере соты сети колесных транспортных средств [137] с возможностью установления прямых соединений.

Концепция прямых соединений между устройствами (англ. Device-to-Device, D2D) в последнее время рассматривается как смежная технология для беспроводных систем 5G, предназначенная для предоставления услуг, включающих обмен данными и видео в реальном времени. Принцип установления прямых соединений открывает новые возможности для услуг, ориентированных на передачу данных между близкорасположенными устройствами, не используя при этом каналы сотовой связи. Отделение части трафика от традиционных сетевых узлов в сеть D2D обеспечивает не только снижение требований к вычислительным ресурсам базовой станции, но и общее увеличение пропускной способности сети. Поэтому D2D является одной из перспективных технологий и, вполне вероятно,

найдет активное применение в сетях 5G.

Установление прямых соединений между близко расположенными мобильными устройствами позволяет более эффективно использовать выделенный спектр частот, увеличить общую пропускную способность сети, а также позволяет предоставлять услуги на базе технологии P2P (англ. Peer-to-Peer) и определения текущего местоположения (англ. Location-Based Services). Еще одним преимуществом такого типа соединений является возможность организации с помощью устройств, поддерживающих технологию D2D, сетей общественной безопасности, которые должны функционировать там, где сотовая связь по тем или иным причинам недоступна, например, в случае возникновения аварийных ситуаций. Внедрение D2D-технологий постепенно ставит вопрос о пересмотре традиционной архитектуры сотовых сетей, центральными элементами которых являются базовые станции [41].

При организации D2D-соединений возникает множество требующих решения задач. Одной из наиболее принципиальных является разделение частотного ресурса между двумя типами соединений: D2D-соединениями и соединениями традиционной сотовой связи. Совокупность различных аспектов, в том числе интерференция и безопасность, не позволяет с уверенностью дать ответ: должны ли D2D-устройства использовать строго выделенный для них спектр частот, или у них может быть доступ к частотам, используемым устройствами сотовой связи. К тому же, задача распределения частот осложняется тем, что устройства в некоторых случаях могут переключаться между обоими типами соединений.

Соединения между транспортными средствами V2X, основанные на применении принципа прямых соединений, позволят транспортным средствам обмениваться данными с близлежащими транспортными средствами, пешеходами и дорожной инфраструктурой с целью повышения безопасности дорожного движения. Они позволят обеспечить информирование водителей о потенциально опасных объектах/условиях на их пути, чтобы те в свою очередь могли

своевременно реагировать, предпринимать действия во избежание несчастных случаев [20, 43, 98]. Быстрое развертывание сетей V2X ожидается в начале 2020-х годов, и этот процесс будет активно поддерживаться со стороны государственных органов, поставщиков телекоммуникационных услуг, автомобильной промышленности и стандартизирующих организаций, благодаря чему будут приняты как необходимая законодательная база, так и развернута соответствующая дорожная инфраструктура.

Другой вариант организации V2X соединений заключается в использовании существующей сотовой инфраструктуры, основанной на спецификациях сетей 5G. Технология 5G обладает всеми преимуществами широкополосных беспроводных технологий, такими как высокая надежность, повсеместность и низкая стоимость благодаря уже развернутой инфраструктуре [13, 14]. Действительно, сетевой интерфейс 5G будет интегрирован в обычные пользовательские устройства, такие как смартфоны, и пользователи уже привыкли подключаться к сети Интернет с помощью этих устройств в дороге. Использование технологий сотовой связи для поддержки V2X порождает много проблем, включая эффективные методы распределения ресурсов в условиях подвижности, достаточно жесткий контроль качества для поддержки строгих требований по ограничению величины задержки и надежности V2X приложений, а также влияние услуг мобильной связи для традиционных пользователей мобильных сетей [12, 23]. Более того, ожидается, что большинство соединений V2X будут происходить между транспортными средствами. Принцип, основанный на создании специальной инфраструктуры, изначально не поддерживает прямые соединения между транспортными средствами (англ. Vehicle-to-Vehicle, V2V) (что крайне важно для критически важных услуг и обеспечения безопасности); общая задержка может увеличиться из-за прохождения сообщений через узлы инфраструктуры, прежде чем они будут перераспределены обратно на целевые транспортные средства. Эта проблема не может быть решена без использования принципа прямых соединений между устройствами (D2D) [33, 72, 81], включенного в спецификации 3GPP, начиная с

Release 12, и переработанного для удовлетворения требований V2X в Release 14.

Рассмотрим систему, в которой транспортные средства обмениваются сообщениями между собой и сотовой инфраструктурой при различной плотности транспортных средств, конфигурации сети [2, 3] и настроек приложений. Применяя методы теории массового обслуживания (ТМО) [22] для разработки математической модели, основанной на дискретном моделировании процесса передачи данных [11, 39], можно получить относительно точные оценки верхней и нижней границ рассматриваемых показателей: вероятности потери пакетов и среднего времени пребывания в очереди, от которых в наибольшей степени зависят надежность и время ожидания, соответственно.

Рассмотрим зону обслуживания одной базовой станции (BS) в форме круга с фиксированным радиусом R и дорогой, пересекающей эту область (рис. 1.6).

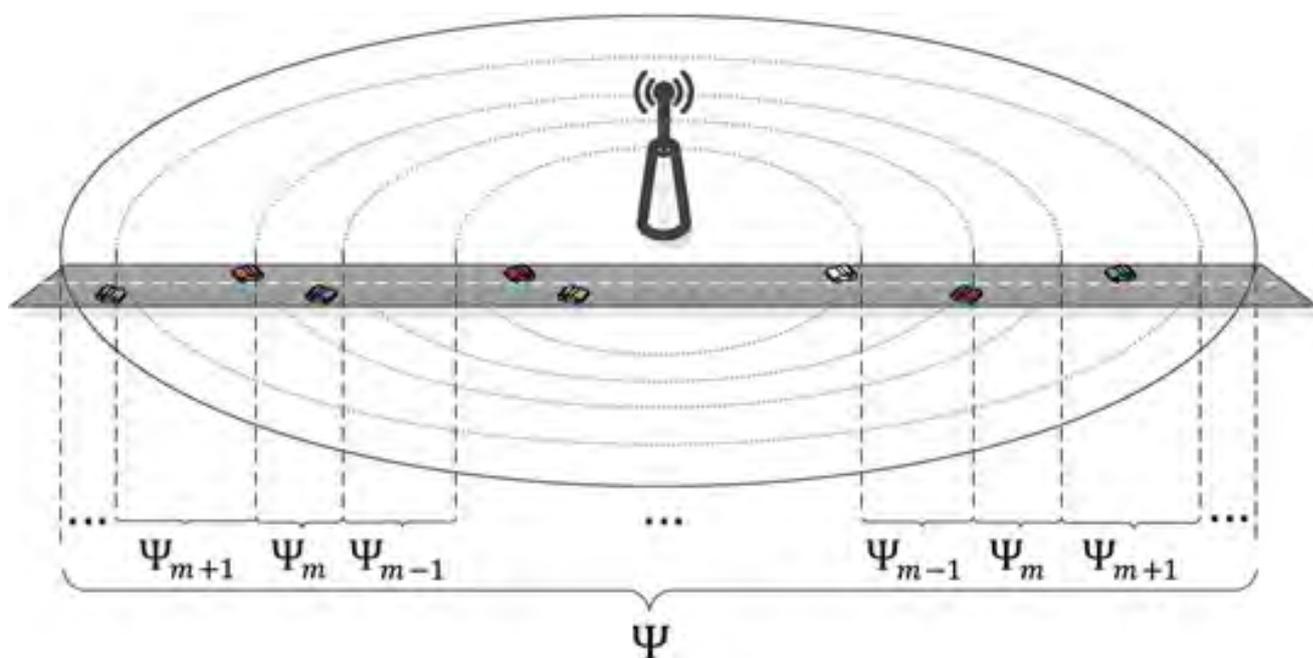


Рис. 1.6. SQI-подразделение зоны обслуживания.

Предположим, что ровно K транспортных средств равномерно распределены по площади круга. Каждое транспортное средство оборудовано интерфейсом, который позволяет ему периодически отправлять пакеты (например, передавать свое текущее состояние, скорость, положение и т.п.) базовой станции. Предположим, что размер пакетов является фиксированной величиной для всех

транспортных средств и равен s байт.

Базовая станция принимает пакеты от транспортных средств. После получения такие пакеты могут:

1. отправляться по широковещательной рассылке в нисходящем направлении всем остальным транспортным средствам в пределах зоны обслуживания, когда нет возможности для установления V2V-соединения;
2. рассылаться в более отдаленные области зоны обслуживания;
3. отправляться на удаленный/пограничный сервер для дальнейшей обработки.

Исследуемая модель фокусируется только на анализе производительности канала в восходящем направлении. Интервалы между моментами генерации пакетов транспортным средством фиксированы и равны τ мс. Передача пакета считается успешной, если он передается на базовую станцию до того, как то же самое транспортное средство сгенерирует следующий пакет (вероятно, передающий более свежую информацию). Если пакет не передается в течение τ , он считается неактуальным и удаляется из системы для экономии ресурсов системы.

В базовом сценарии предполагается, что, когда транспортные средства прибывают в зону обслуживания, они следуют стандартной процедуре обслуживания, определенной в последних спецификациях 3GPP. Соответственно, как только генерируется готовый к передаче первый пакет, транспортное средство следует процедуре произвольного доступа, чтобы сообщить базовой станции о необходимости передачи данных. Планировщик базовой станции может принять запрос на передачу и поместить его в виртуальную очередь. Для последующих пакетов нет необходимости проходить эту процедуру повторно, так как планировщик будет автоматически пытаться выделять транспортному средству ресурсные блоки до тех пор, пока оно не выйдет из зоны обслуживания. В данном сценарии выделяется отдельная полоса пропускания, которая используется исключительно для V2X-соединений, чтобы избежать создания помех другим пользователям сотовой связи.

Базовая станция определяет значение $m \in M$ индекса качества канала связи (англ. Channel Quality Index, CQI), зависящее от положения транспортного средства в соте, и соответствующую схему модуляции и кодирования (англ. Modulation and Coding Scheme, MCS), которая в свою очередь определяет доступную гарантированную минимальную скорость передачи ν , обеспечиваемую одним выделенным RB [66]. Следовательно, чем ниже качество канала (чем ниже CQI), тем больше количество RB, необходимых для передачи пакета фиксированного размера. Количество необходимых RB для передачи пакета при заданном качестве канала может быть легко найдено как отношение $\left\lceil \frac{s}{\nu \Delta} \right\rceil$. Может получиться так, что количество необходимых RB для одного пакета одинаково для различных CQI, поэтому для простоты будем объединять такие CQI в группы $L_m \in L$ с одинаковым требованием к RB, где $m \in M, |M| = M$. Пример соответствия между такими группами и количеством необходимых RB для $s = \{100, 300, 500, 1000\}$ байтов представлен в таблице 1.1. Поскольку качество канала зависит от расстояния между устройствами, можно представить зону обслуживания в виде набора смежных колец ψ_m , как показано на рис. 1.6.

Предположим, что среднее число транспортных средств внутри каждого из колец является стационарным, то есть можно пренебречь его изменением с течением времени. Это означает, что в модели может применяться любая модель движения транспортных средств при условии соблюдения вышеупомянутого условия. Понятие виртуальной очереди вводится для того, чтобы избежать чрезмерных задержек, поскольку передаваемая информация чувствительна к длительности передачи.

Чтобы проанализировать предложенную модель, сначала представим процесс обслуживания трафика между транспортными средствами и базовой станцией в виде системы массового обслуживания.

Таблица 1.1. Соответствие между CQI-RB.

CQI, l	v_l , [bit/ms]	h_m , [RB]			
		$s = 100$ B	$s = 300$ B	$s = 500$ B	$s = 1000$ B
1	25.59	32	94	157	313
2	39.38	22	62	102	204
3	63.34	14	38	64	127
4	101.07	8	24	40	80
5	147.34	6	18	28	55
6	197.53	6	14	21	41
7	248.07	4	10	17	33
8	321.57	4	8	13	25
9	404.26	2	6	10	20
10	458.72	2	6	9	18
11	558.72	2	6	8	15
12	655.59	2	4	7	13
13	759.93	2	4	6	11
14	859.35	2	4	5	10
15	933.19	2	4	5	9

В данной модели используются типовые полосы частот шириной F , предназначенные для V2V (например, 10 МГц). Это означает, что есть

$c = \frac{F}{(180 + 20) \cdot 10^3}$ RB, доступных во временном интервале длиной Δ мс, который

представлен на рис. 1.7. Число временных интервалов, доступных для передачи

пакета, определяется как $l_\tau = \left\lfloor \frac{\tau}{\Delta} \right\rfloor$. Остальные $l_\tau - 1$ мс времени жизни пакета

представлены в виде виртуального буфера размером $r = c \cdot (l_\tau - 1)$. Запрашиваемые

RB для передачи пакета далее в работе представлены с точки зрения теории

массового обслуживания как последовательность групповых заявок. Каждая

группа состоит из заявок, которые могут занимать позиции в виртуальном буфере.

Поэтому одним из способов моделирования является представление процесса

обслуживания в виде системы массового обслуживания с дискретным временем с

групповыми процессами поступления и обслуживания. Следует отметить, что

пакет не обязательно обслуживается целиком в одном слоте, и, соответственно,

заявки, принадлежащие одной и той же группе, могут занимать позиции в нескольких временных слотах.

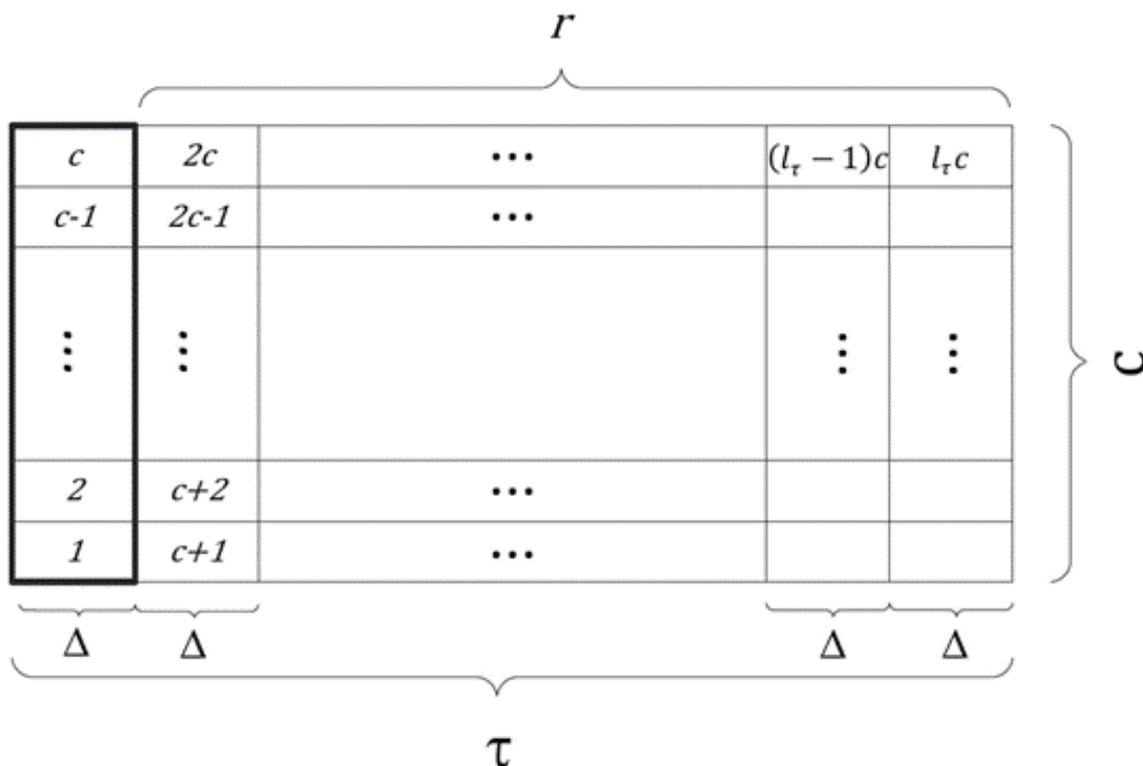


Рис. 1.7. Схема виртуальной очереди.

Диаграмма системного времени показана на рис. 1.8. Системное время разделено на интервалы с длительностью кадра τ мс, определяемой как интервал между последовательными моментами генерации пакетов от одного транспортного средства. Рассмотрим две модели выбора моментов наблюдения для принятия решения о распределении ресурсов. В первой, т.н. «модели позднего прибытия» (англ. Late Arrival Model, LAM), решение принимается непосредственно перед окончанием слота для всех групп заявок, поступивших в течение слота. Во второй, т.н. «модели раннего прибытия» (англ. Early Arrival Model, EAM), решение принимается сразу после начала слота для всех групп заявок, поступивших после начала слота. [31]. Легко заметить, что точки наблюдения образуют вложенную одномерную цепь Маркова $\{\xi_n, n = 0, 1, \dots, l_\tau c\}$, описывающую число заявок в системе как для EAM, так и для LAM. Обозначим число заявок, поступивших в течение n слота, как a_n . Число обслуживаемых заявок в n -м слоте равно

$d_n = \min(\xi_n, c)$, так как базовая не может предоставить более c RB (англ. Resource Block).

В LAM ξ_n зависит от числа заявок в предыдущей точке наблюдения ξ_{n-1} следующим образом: $\xi_n = \min(a_n + \xi_{n-1}, c + r) - \min(\xi_{n-1}, c)$, где уменьшаемое число – это число заявок после прихода группы заявок с учетом емкости очереди, в то время как вычитаемое число – это число обслуживаемых групп заявок в предыдущем слоте.

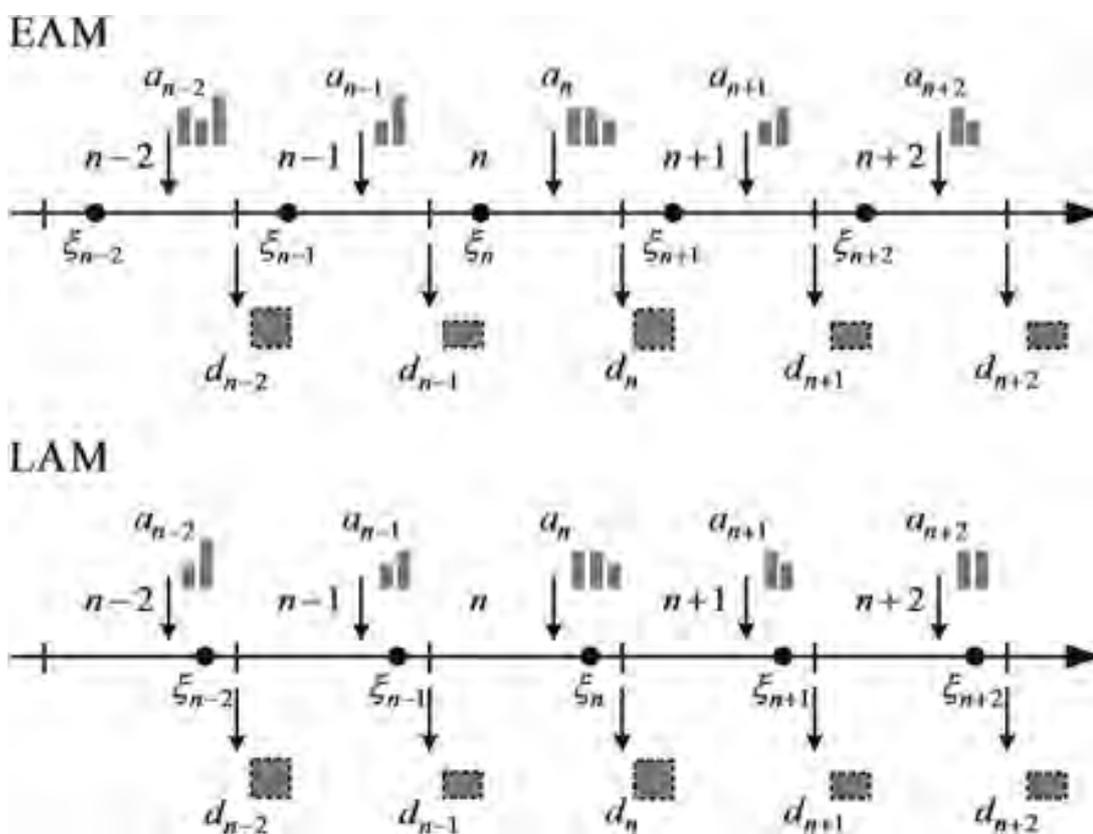


Рис. 1.8. Системное время.

С другой стороны, в EAM $\xi_n = \min(a_n + \max(\xi_{n-1} - c, 0), c + r)$, где первый аргумент – это число заявок в поступивших последовательностях и заявок, которые остались после предыдущего слота, в то время как второй аргумент задает предел для числа заявок как емкость очереди и число приборов. Размер очереди в EAM всегда ниже, чем в LAM, поскольку в EAM наблюдается размер очереди до возможной точки прибытия в слот, что означает, что в EAM время ожидания также

будет меньше. Заявки обслуживаются в системе так же группами на границах слотов.

Заявкам не разрешается немедленно занимать прибор, и обслуживание любых поступивших групп может начаться не раньше начала интервала, следующего за моментом прибытия.

Оценки времени пребывания получены как число временных слотов, затраченных с момента поступления первой заявки до момента обслуживания последней заявки в группе. В модели предполагается принцип «все или ничего», то есть всякий раз, когда в систему с ξ заявками приходит группа заявок длины h_m , такой что $\xi + h_m > c + r$, вся группа заявок теряется.

Как правило, транспортное средство начинает передачу, как только ему предоставляется канал по процедуре RACH (англ. Random Access Channel). Таким образом, также предполагается, что число пакетов, сгенерированных в пределах τ , равномерно распределено по времени, поскольку успешное выполнение процедуры RACH не зависит от текущего ТТИ (англ. Transmission Time Interval), и транспортное средство может начать передачу в любом слоте с той же вероятностью. Следовательно, можно вывести вероятность γ_k того, что в одном слоте будет сгенерировано ровно k пакетов, что соответствует схеме Бернулли. Пусть поступление пакета в рассматриваемом слоте будет успехом, тогда неуспехом будет считаться поступление пакета в любом из остальных $l_\tau - 1$ интервалов. Следовательно, вероятность успеха равна $\frac{1}{l_\tau}$, а вероятность неуспеха

составляет $\frac{l_\tau - 1}{l_\tau}$. Тогда вероятность γ_k можно найти как:

$$\gamma_k = \binom{K}{k} \left(\frac{1}{l_\tau}\right)^k \left(\frac{l_\tau - 1}{l_\tau}\right)^{K-k} = \frac{K!(l_\tau - 1)^{K-k}}{k!(K-k)!l_\tau^K}, \quad (1.2)$$

где $k = 0, \dots, K$, а число испытаний K — это число транспортных средств, которые генерируют пакеты в пределах τ .

Зная соответствие между m -й группой CQI и площадью $|\psi_m|$, которой принадлежит этот CQI, а также площадь всей зоны обслуживания $|\psi|$, можно найти вероятность того, что транспортное средство установит соединение с CQI m -й группы $\beta_m := \frac{|\psi_m|}{|\psi|}$, $m \in M$. Эти вероятности задают распределение размера группы при поступлении. В каждом слоте поступают k групп заявок, которые образуют последовательность $(n(1), \dots, n(k))$, где $n(i)$ - размер i -й группы, $i = 1, \dots, k$. Тогда можно определить набор всех возможных последовательностей, которые могут поступить в одном слоте, как $\mathcal{N} = \left\{ (k, (n(1), \dots, n(k))), k = 1, \dots, K, n(i) \in \{h_1, \dots, h_m\} \right\}$ с числом элементов $|\mathcal{N}| = \sum_{k=1}^K M^k$, которое является сочетанием с повторениями относительно всех возможных количеств поступивших групп заявок.

Поскольку число пакетов, генерируемых в слоте, и их размеры взаимно независимы, вероятность получить некоторую последовательность в произвольном слоте вычисляется как произведение вероятностей наступления следующих событий: поступление (k, \mathbf{n}) групп в слоте, каждая из групп имеет свою собственную длину h_m , и группы упорядочены одним из M^k способов. Подводя итог для вышеупомянутого утверждения, вероятность поступления последовательности (k, \mathbf{n}) определяется как

$$P\{k, (n(1), \dots, n(k))\} = \frac{\gamma_k}{M^k} \prod_{m \in M} (\beta_m^g), \quad (1.3)$$

где $g = \sum_{j=1}^k I\{n(j) = h_m\}$ является числом групп одинаковой длины h_m в последовательности \mathbf{n} , а $I\{x\}$ – индикатор утверждения x , такая что $I\{x\} = 1$, если x истинно, и $I\{x\} = 0$ иначе.

Поступающая последовательность групп в слоте естественным образом

может быть разделена на два вектора $A_j(k, \mathbf{n})$ и $B_j(k, \mathbf{n})$, как векторы принятых и отклоненных групп в последовательности соответственно, где j - число заявок в системе на предыдущем слоте. Вектор формируется в соответствии с выбранной схемой планирования пакетов [56, 63]. В рамках исследования будем рассматривать схему FCFS (англ. First Come First Serve) (см. рис. 1.9).

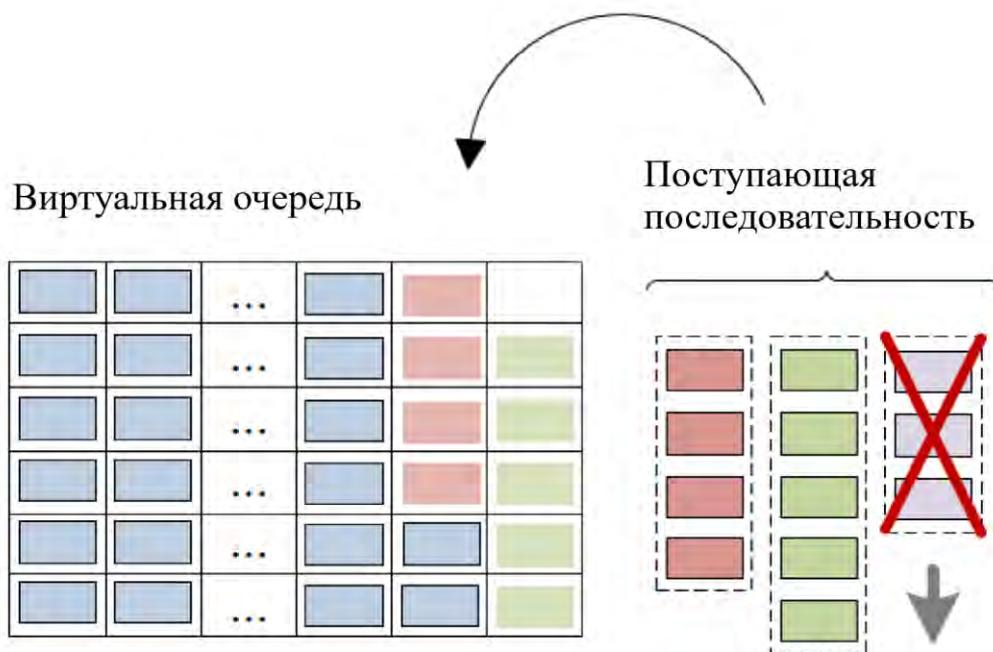


Рис. 1.9. Планирование пакетов FCFS.

В FCFS группы сохраняются в очереди до тех пор, пока следующая, $(k^* + 1)$ -я группа, не приведет к переполнению очереди. Вектор $A_j(k, \mathbf{n})$ в этом случае

определяется как $A_j(k, \mathbf{n}) = (1, \dots, k^*)$, где $k^* \in \{1, \dots, k\}$ такой, что $\sum_{i=1}^{k^*} n(i) \leq c + r - j$ и

$\sum_{i=1}^{k^*+1} n(i) > c + r - j$. Аналогично, вектор $B_j(k, \mathbf{n}) = (k^* + 1, \dots, k)$, где k^* такой же, как

для $A_j(k, \mathbf{n}) = (1, \dots, k^*)$.

Чтобы найти число заявок во всех принятых группах в произвольном слоте, можно использовать следующее выражение: $q_\alpha(k, \mathbf{n}, j) = \sum_{i \in A_j(k, \mathbf{n})} n(i)$. Таким

образом, вероятность получения s -заявок во временном слоте является суммой всех вероятностей поступления последовательностей, которые состоят из ровно s заявок: $\alpha_i(s) = \sum_{k, \mathbf{n} \in N: q_a(k, \mathbf{n}, i) = s} P\{k, \mathbf{n}\}$. В то же время максимально возможное число поступающих заявок в интервале N происходит в случае, когда все K транспортных средств принадлежат к первой группе CQI и генерируют пакеты в этом слоте, поэтому $N = K * h_1$.

Утверждение 1.1. Элементы матрицы переходов $\mathbf{P}_L = [p_{i,j}^{EAM}]$, $i, j = 0, \dots, c+r$ в случае EAM определяются следующим образом:

$$p_{i,j}^{EAM} = \begin{cases} \alpha_i(j), i = 0, \dots, c+1, j = 0, \dots, c+r-1, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = 0, \dots, c+1, j = c+r, \\ \alpha_i(j-i+c), i = c+1, \dots, c+r, j = i-c, \dots, c+r-1, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = c+1, \dots, c+r, j = c+r, \\ 0, i = c+1, \dots, c+r, j = 0, \dots, i-c-1, \end{cases} \quad (1.4)$$

а элементы матрицы переходов $\mathbf{P}_L = [p_{i,j}^{LAM}]$, $i, j = 0, \dots, c+r$ в случае LAM как:

$$p_{i,j}^{LAM} = \begin{cases} \alpha_i(j), i = 0, \dots, c+1, j = 0, \dots, c+r-1-i, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = 0, \dots, c+1, j = c+r-i, \\ \alpha_i(j-i+c), i = c+1, \dots, c+r, j = i-c, \dots, r-1, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = c+1, \dots, c+r, j = r, \\ 0, i = 1, \dots, c+r, j = \max(c+r-i, r+c), \dots, c+r. \end{cases} \quad (1.5)$$

Решения уравнения $\boldsymbol{\pi}_u = \boldsymbol{\pi}_u \mathbf{P}_u$, где $u \in \{EAM, LAM\}$, дают распределения вероятностей $\boldsymbol{\pi}_u$ для обеих моделей.

Получив распределение $\boldsymbol{\pi}_i$, можно оценить среднее время ожидания W_u для пакета как:

$$W_u = \Delta \sum_{z=c+1}^r \left[\frac{z}{c} \right] \pi_{u,z}, \quad (1.6)$$

где $\left[\frac{z}{c} \right]$ определяет количество временных интервалов, необходимых для обслуживания всех z заявок перед вновь поступившей группой. Также можно оценить среднее время пребывания Q_u для пакета как:

$$Q_u = \Delta \sum_{z=c+1}^r \left[\frac{z + \sum_{m=1}^M \beta_m h_m}{c} \right] \pi_{u,z}, \quad (1.7)$$

где $\sum_{m=1}^M \beta_m h_m$ - средний размер прибывшей группы.

Утверждение 1.2. Вероятность потери пакета B_u вычисляется по формуле:

$$B_u = \frac{\sum_{z=0}^{c+r} \pi_{u,z} \sum_{(k,\mathbf{n}) \in N} P(k, \mathbf{n}) \dim(B_i(k, \mathbf{n}))}{\sum_{(k,\mathbf{n}) \in N} P(k, \mathbf{n}) k}, \quad (1.8)$$

где в числителе среднее число потерянных групп, а в знаменателе среднее число поступающих групп в слоте, $u \in \{EAM, LAM\}$.

В этом разделе представлены результаты численного эксперимента, проведенного при различных условиях и конфигурациях сети: $c = \{25, 50, 75\}$ RB, $r = (\tau - \Delta) * c$ RB, $50 \leq K \leq 300$ транспортных средств, $s = \{100, 300, 500, 1000\}$ байт, $\tau = 100$ мс, $\Delta = 1$ мс. На рис. 1.10 показано сравнение между EAM и LAM. Разница между двумя моделями при предложенных входных параметрах практически незаметна с точки зрения рассматриваемых показателей. По этой причине далее ограничимся представлением результатов только LAM, поскольку она дает верхние оценки параметров, и, следовательно, представляется более интересным.

Как видно из рис. 1.11 (а) и рис. 1.12 (а) существует почти линейная зависимость между нагрузкой поступающего трафика (числом транспортных средств) и вероятностью потери пакетов, в то время как рис. 1.11 (б) и рис. 1.12 (б),

напротив, демонстрируют быстрый рост в случае, если система близка к «насыщению», то есть число принятых заявок в интервале приблизительно равно числу выделенных V2X RB на один слот.

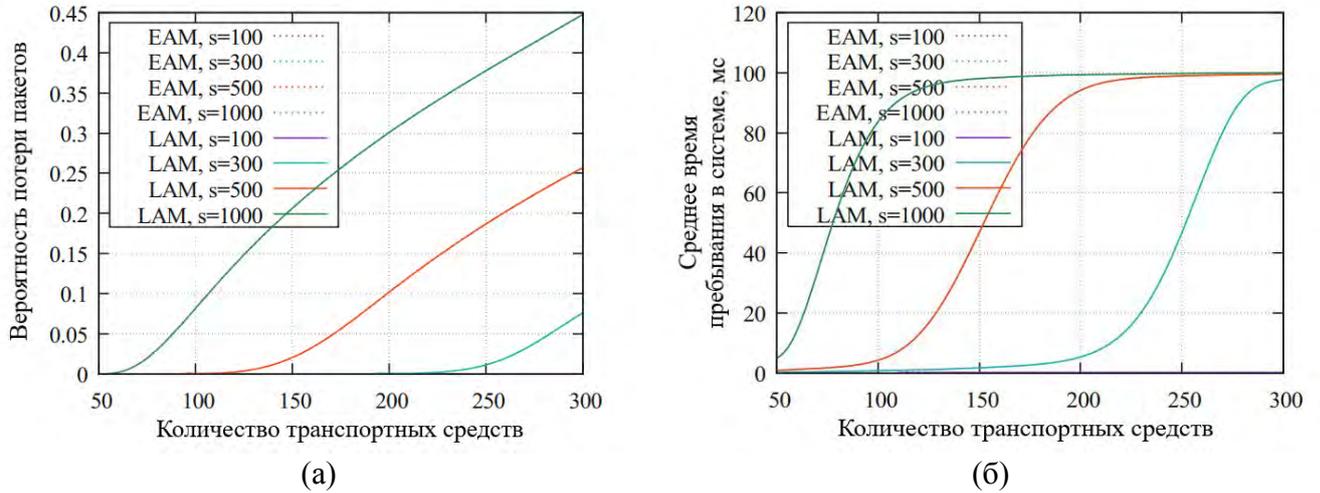


Рис. 1.10. Сравнение моделей раннего и позднего прибытия.

Ожидается, производительность ухудшается по мере того, как уменьшается количество доступных ресурсов c и увеличивается размер пакета s . Например, на рис. 1.12 (а) показано, что почти половина пакетов длиной 1000 байтов теряется для полосы частот системы (то есть полосы пропускания 10 МГц) и дороги с 300 передающими данные транспортными средствами.

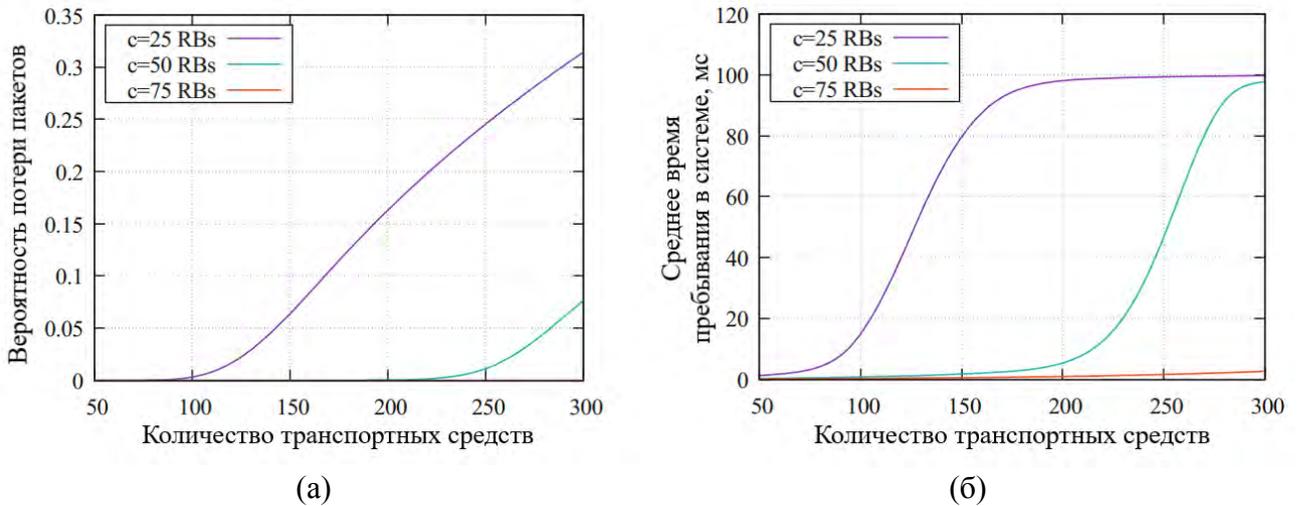


Рис. 1.11. Оценка параметров в зависимости от c , ($s = 300$ байт).

Разработанная аналитическая модель позволяет оценивать вероятность потери пакетов и среднюю задержку, не требуя больших временных и

вычислительных затрат на имитационное моделирование. Результаты четко указывают на необходимость изучения альтернативных схем планирования пакетов по сравнению с рассмотренной схемой FCFS, чтобы учитывать передачу пакетов в зависимости от их требований, накладываемых ограничениями соответствующей предоставляемой услуги.

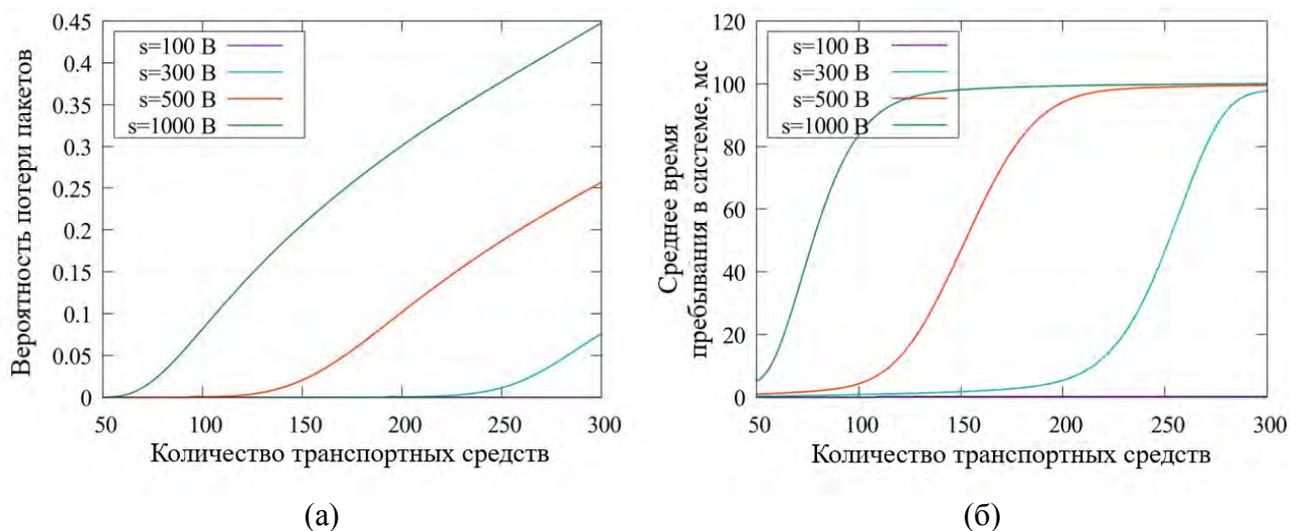


Рис. 1.12. Оценка параметров в зависимости от s , ($c = 50$ RB).

Таким образом, численный анализ модели, представленный выше, показывает, что удаленность пользователей является определяющим фактором роста потребности устройств в радиоресурсе. Так требование удаленных пользователей может в десятки раз превосходить требования близкорасположенных пользователей для предоставления одной и той же услуги с одним и тем же качеством обслуживания. Из-за роста общей нагрузки в системе наблюдается резкий рост длительностей задержек, а также вероятности блокировок. Одним из наиболее эффективных методов снижения нагрузки, исследованию которого посвящена оставшаяся часть работы, является принцип многоадресной рассылки, теоретически способный предоставлять ресурс для неограниченного числа пользователей.

1.3. Обзор принципов мультивещания и постановка задачи исследований

В связи с увеличением потребностей пользователей, а также числа подключенных к сети устройств, наблюдается рост трафика в беспроводных сетях.

По прогнозам Cisco [39, 40], ожидается, что мировой трафик вырастет в три раза к 2021 году и достигнет 3,3 зеттабайт. Ожидаемый взрывной рост новых видеослужб и приложений, поддерживаемых в существующих (например, LTE) и будущих (пятое поколение - 5G) мобильных системах, вынуждает операторов мобильной связи пытаться оптимизировать пропускную способность и эффективность своих сетей [85]. При этом применение технологий многоадресной и ширококвещательной передачи данных является одним из наиболее перспективных решений, которые позволили бы справиться с лавиной данных мультимедийных услуг и нивелировать их влияние на инфраструктуру мобильных сетей для того, чтобы иметь возможность доставлять ожидаемое качество восприятия (англ. Quality of Experience, QoE) пользователям.

В этой главе предлагается аналитическая модель для анализа влияния подвижности пользователей при предоставлении многоадресных услуг. В частности, основное внимание уделяется задаче формирования многоадресной подгруппы, целью которой является максимизация совокупной скорости передачи данных в системе (англ. Aggregate Data Rate, ADR) [2, 71]. В работе утверждается, что при фиксированном числе пользователей многоадресных услуг в рассматриваемой области, их движение может быть смоделировано в виде сети массового обслуживания, где состояние сети описывает число пользовательских устройств (англ. User Equipment, UE), которые обслуживаются в соответствии с набором конкретных параметров [22]. Предложенная модель верифицируется путем сравнения ее с наиболее известными методами имитационного моделирования движения, используемыми в научной литературе. Модели движения Levy Flight, как утверждается, в наибольшей степени соответствуют движению человека в естественной среде, а также применимы к таким техногенным средам, как города, аэропорты, вокзалы и автомагистрали, обладая при этом свойством масштабируемости [49]. В работе проводится сравнение модели Levy Flight с моделью Random Walk, которая также широко используется в исследованиях движения. Результаты исследования показывают, что во всех

рассмотренных средах относительный разрыв между аналитическим и имитационным подходами составляет не более пяти процентов. Актуальность этого результата заключается в том, что предложенная аналитическая модель может использоваться для учета подвижности пользователя в реальных LTE-системах, что позволит избежать высокой вычислительной сложности, возникающей при использовании имитационных методов.

LTE на данный момент является наиболее предпочтительным стандартом для организации многоадресной передачи данных [6, 10]. В системах с множественным доступом с ортогональным частотным разделением (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) одной из наиболее важных проблем является процедура адаптивного управления каналом, в частности, адаптивная модуляция и кодирование (англ. Adaptive Modulation and Coding, AMC). В сценарии многоадресной передачи, где нескольким пользователям требуется один и тот же контент, выбор параметров передачи выполняется с учетом параметров всей группы пользователей. В результате этого возникает сразу несколько проблем, связанных с различиями в качестве каналов связи пользователей. В частности, выбор схемы модуляции и кодирования (MCS) зависит от индикатора качества канала (CQI), который каждый пользователь сообщает своей eNodeB [16]. В условиях подвижности CQI каждого пользователя периодически меняется. Это влечет за собой изменение конфигурации всей группы многоадресной рассылки, которая в худшем случае должна пересчитываться на каждом интервале времени передачи (TTI), [18].

Традиционная схема многоадресной передачи (англ. Conventional Multicast Scheme, CMS) [86, 90] является идеальной схемой с точки зрения справедливого распределения ресурсов, поскольку все пользователи многоадресной передачи обслуживаются с одинаковой скоростью передачи данных. С другой стороны, CMS показывает низкую спектральную эффективность из-за использования уровня MCS, равного уровню пользователя с худшим качеством канала связи.

Чтобы избавиться от этого недостатка, в адаптивной многоадресной схеме

(англ. Opportunistic Multicast Scheme, OMS) [62] используется разбиение на отдельные группы пользователей. В каждом временном интервале OMS обслуживает только одну многоадресную группу, что позволяет максимизировать заданную целевую функцию (например, пропускную способность сети или некоторую функцию справедливости). Недостатком этого подхода является меньшая эффективность многоадресной передачи. Кроме того, OMS обеспечивает справедливое распределение ресурсов только в долгосрочной перспективе, поскольку не все пользователи обслуживаются на каждом ТТІ.

В группе мультивещания скорость передачи данных на один выделенный ресурсный блок определяется устройством с худшим соотношением сигнал/шум при взаимодействии с базовой станцией. Этот принцип ограничивает устройства, которые имеют лучшее соотношение сигнал/шум (например, находятся ближе к базовой станции) и могут развивать более высокие скорости передачи данных. Проблема может быть решена путем разделения одной группы мультивещания на несколько подгрупп в соответствии с поддерживаемыми устройствами схемами модуляции и кодирования. Базовая станция в таком случае может производить оптимальное распределение ресурсных блоков по подгруппам в соответствии с передаваемыми устройствами значениями CQI (Channel Quality Indicator). Каждый CQI индекс определяет минимальную гарантированную скорость передачи данных на один ресурсный блок для устройств, находящихся в подгруппе мультивещания.

ГЛАВА 2

АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА ПО МОБИЛЬНОЙ СЕТИ МУЛЬТИВЕЩАНИЯ

2.1. Особенности мультимедийных услуг с многоадресной передачей данных

Принципиально новые технологии и концепции мобильных сетей пятого поколения позволят внедрить широкий спектр приложений и услуг. Уже первые испытания 5G будут включать технологии многоадресной передачи данных для организации видеотрансляций на мероприятиях мирового масштаба: в 2018 году на XXIII зимних Олимпийских играх в Пхенг Чанге был представлен прототип сети 5G, а для летних Олимпийских игр 2020 года в Токио планировалось запустить полноценную сеть 5G в тестовом режиме.

Видеоуслуги являются ключевым фактором эволюционного развития сетей, открывая новые возможности для бизнеса [113]. Уже появился новый класс интерактивных и персонализированных телевизионных услуг, вокруг которых сформировался перспективный и быстрорастущий рынок. Это дает новые бизнес-модели, основанные на распределении доходов, модели арендованной / размещенной сети и других. Новые бизнес-модели развивают сотрудничество между операторами сетей, поставщиками контента, владельцами спектров частот и рекламодателями.

Альянс мобильных сетей следующего поколения (англ. Next Generation Mobile Networks, NGMN), в состав которого входят ведущие мировые операторы телекоммуникационных услуг, определил следующие минимальные требования для многоадресных услуг:

- фактическая скорость передачи данных в нисходящем направлении до 200 Мбит/с (максимальная скорость передачи данных предусмотрена для передачи видео в разрешении 4K/8K);
- общее время задержки менее 100 мс;

- поддержка подвижных пользователей на скорости до 500 км/ч;
- автономность устройств от нескольких дней до нескольких лет, в зависимости от сценария использования (самая высокая автономность требуется для устройств МТС).

Кроме того, на базе многоадресной передачи в сетях 5G можно реализовать приложения по обеспечению общественной безопасности, так как мобильные сети могут эффективно предоставлять такие услуги в критических ситуациях. Эта функция называется активатором системы групповой связи (англ. Group Communication System Enabler, GCSE). При использовании этой функции получатели динамически переключаются между многоадресной и одноадресной передачей в зависимости от того, какой из методов позволяет достичь более высокой эффективности в той или иной ситуации.

Новая архитектура сетей 5G и новый радиointерфейс обеспечат высококачественное вещание видеоданных для телевидения сверхвысокой четкости (англ. Ultra High Definition Television, UHD TV). Крупнейшие провайдеры онлайн-контента, такие как Netflix, Amazon и YouTube, планируют выпускать сериалы и фильмы изначально в форматах UHD TV, таких как 4K, а также 8K, процесс перехода к которому уже обретает вполне реальные очертания. Действительно, новые приложения, использующие передачу видео, служащие дополнением к UHD TV или работающие независимо от других, такие как дистанционное присутствие, дополненная реальность (англ. Augmented Reality, AR) и виртуальная реальность (англ. Virtual Reality, VR), станут доступны в ближайшем будущем и уже включены в число ключевых факторов, определяющих требования к сетям 5G.

AR — это технология, в которой виртуальный мир дополняет реальный. Её основное применение — это реальная среда, в которую добавляются элементы виртуальной среды, создаваемой с помощью компьютерной графики. Функция наложение элементов компьютерной графики на картину реального мира, обозреваемую через камеру телефона, уже сегодня доступна на многих

приложениях, но соответствующие бизнес-модели и перспективы применения всё ещё находятся на стадии развития. В последние годы приложения дистанционного присутствия привлекают всё большее внимание как средство предоставления инновационных возможностей для совместной деятельности людей. Услуги виртуальной реальности могут помочь людям ощутить свое присутствие в мире, который выглядит реальным, а также дать им возможность взаимодействовать с этим миром. Поскольку VR эмулирует реальный мир, потоковое видео в реальном времени должно передаваться в очень высоком качестве. Поэтому, по некоторым оценкам, для передачи такого видео по беспроводной сети потребуется скорость передачи данных в 4–28 Гбит/с, так как в этом случае сжатие данных может быть лишь незначительным, или его может не быть вовсе. Все эти новые приложения требуют очень высоких скоростей передачи данных и низких задержек. Как упоминалось ранее, многоадресная передача является ключевым фактором для удовлетворения этих требований, обеспечивая наиболее эффективное использование спектра.

Одним из наиболее действенных методов повышения спектральной эффективности при использовании многоадресной передачи данных является выделение подгрупп пользователей. Пользовательские устройства могут быть разделены на группы таким образом, чтобы от этого выиграла подгруппа пользователей или пользователи всей сети, то есть, увеличилась скорость передачи данных или обеспечивались показатели QoS [19]. Внутри подгруппы скорость всех устройств всегда одинакова и равна скорости устройства с худшим качеством канала. В большинстве случаев это самое удаленное устройство от базовой станции. На рис. 2.1 показаны два примера формирования подгрупп многоадресной передачи для пользователей, находящихся в зоне покрытия базовой станции. В случае (а) весь ресурс базовой станции отдан для обслуживания пользователей единой зоны покрытия, и тогда все пользователи будут получать данные на скорости 1 мегабит в секунду. В случае (б) ресурс базовой станции разделен между двумя группами, тогда скорость 1 мегабит в секунду останется только на внешнем

кольце, а пользователи во внутреннем круге достигнут скорости 3 мегабит в секунду, тем самым увеличив пропускную способность сети без необходимости в использовании дополнительных ресурсов.

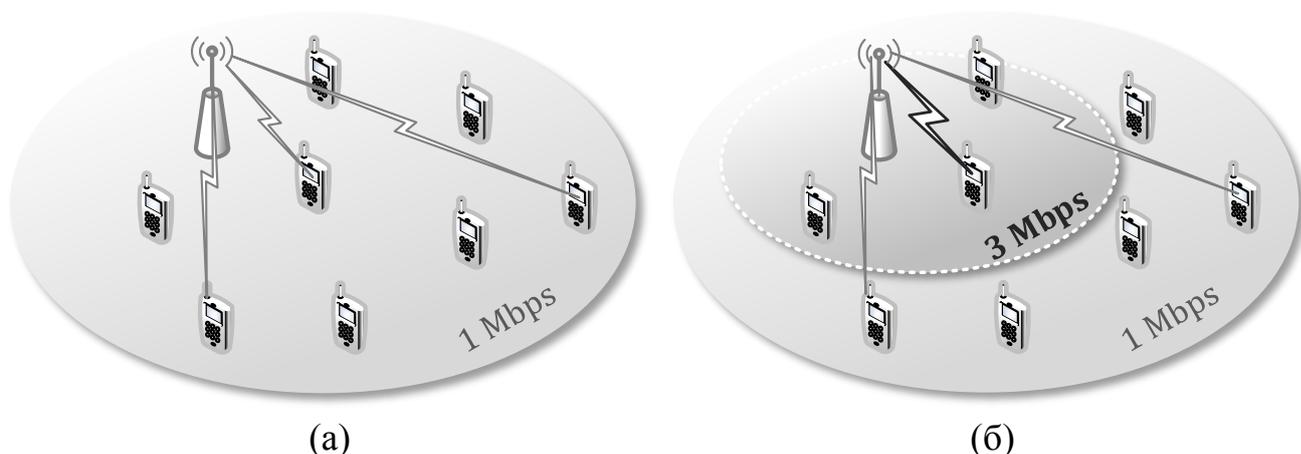


Рис. 2.1. Пример формирования (а) одной и (б) двух подгрупп многоадресной передачи.

В моделях зоны обслуживания без существенных препятствий на пути сигнала, чем ближе пользователь к базовой станции, тем больше доступная скорость передачи данных, приходящаяся на один выделенный блок ресурсов, поскольку значение этой скорости зависит от качества канала [67] и, следовательно, от расстояния между пользовательским оборудованием и базовой станцией. В сетях LTE различают 15 уровней качества канала [5].

Конфигурация многоадресных групп, как правило, зависит от расположения устройств. В системах с подвижными пользователями, необходимо динамически менять конфигурацию групп пользователей (динамически разбивать на многоадресные подгруппы) [17]. Помимо движения, в то же время само поведение устройства также может быть динамическим. Например, некоторые датчики могут быть всегда включены, например, датчики телеметрии, датчики состояния здоровья, устройства контроля окружающей среды и т. д. Этот тип оборудования применяет периодическую отправку данных с некоторым фиксированным интервалом времени [37]. Между тем датчики безопасности, умные дома и датчики движения передают данные с нерегулярными интервалами, поскольку они зависят от событий случайного характера. Таким образом, можно выделить две модели

работы устройств: первую будем условно называть «ВКЛ», а вторую «ВКЛ-ВЫКЛ» соответственно.

2.2. Построение модели расположения пользователей для анализа суммарной скорости передачи в сети с многоадресной передачей

Рассмотрим зону покрытия BS с одной многоадресной группой, состоящей из множества $M = \{1, \dots, M\}$ абонентов. eNodeB распределяет N RB в соответствии с сообщениями устройств о качестве канала связи (CQI). Обозначим $S = \{1, \dots, S\}$ набор доступных уровней CQI, m_s – число UE с качеством канала, соответствующим s -CQI, $m = (m_1, \dots, m_s)$. Поскольку каждое значение CQI связан с некоторой поддерживаемой MCS, обозначим $b_s, s \in S$ объем данных, передаваемых с помощью одного RB с использованием схемы модуляции и кодирования (MCS), соответствующей s -му CQI.

BS определяет конфигурацию подгруппы, то есть число подгрупп с их соответствующими MCS и число выделенных ресурсов, которая позволяет добиться максимизации ADR. Обозначим как $L = \{1, \dots, L\}, L \in S$ набор подгрупп в текущий момент, а $S_1 = \{s \in S : m_s > 0\}$ как набор CQI, которым соответствует хотя бы один пользователь, и $l_s \in L, s \in S$ как связь между s -CQI и l -й подгруппой. Используемые CQI делятся на существующие подгруппы, т.е. $S_1 = \bigcup_{l \in L} S_1(l)$, и $\forall i < j, \forall s_1 \in S_1(i), \forall s_2 \in S_1(j) : s_1 < s_2$. Далее обозначим $s_l^{\min} = \min\{s \in S_1(l)\}$ как наименьший CQI в l -й подгруппе, и $B_l = b_{s_l^{\min}} \sum_{s \in S_1(l)} m_s$ как совокупную скорость передачи данных (ADR) на один RB в l -й подгруппе. Пусть n_l определяет количество RB, выделенных l -подгруппе, $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_L)$. $L, l_s \in L, s \in S$. Тогда исследуемая задача оптимизации, целевой функцией которой является средняя суммарная скорость передачи данных, формулируется следующим образом:

$$b(\mathbf{n}, L) = \sum_{l \in L} b_{s_l}^{\min} n_l \sum_{s \in S_1(l)} m_s \xrightarrow{\mathbf{n}, L} \max \quad (2.1)$$

$$R_1 : \forall i < j, \forall s_1 \in S_1(i), \forall s_2 \in S_1(j) : s_1 < s_2. \quad (2.2)$$

Замечание 2.1. Согласно [18], если целевой функцией является ADR, то оптимальная конфигурация всегда будет состоять из одной или двух подгрупп, т.е. $1 \leq |L| \leq 2$.

Утверждение 2.1. Согласно замечанию 1 для поиска оптимальной конфигурации подгрупп может использоваться следующая схема:

$$s_2^{\min} = \arg \max \left\{ s \in S_1 \setminus \{s_1\} : b_s \sum_{i \geq s} m_i \right\}, s_1^{\min} = \{s_1 \in S_1\}, \quad (2.3)$$

$$b = \begin{cases} b_{s_1}^{\min} MN, \text{ если } B_1 > B_2, \\ B_1 \cdot 1 + B_2 \cdot (N - 1), \text{ иначе.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Замечание 2.2. s_2^{\min} - значение CQI определяет разбиение пользователей на две логические подгруппы в зависимости от расстояния до BS. Значения ADR B_1 и B_2 рассчитываются для каждой из двух подгрупп, в результате чего определяется конфигурация в виде одной или двух подгрупп, и затем используются для расчета ADR, как показано в (2.17).

В реальной сети необходимо периодически решать вышеупомянутую задачу оптимизации, так как с течением времени для UE переопределяются значения CQI. Схема, предложенная в утверждении 2.1, опирается на текущую ситуацию в сети, то есть определяется числом UE и значениями CQI рассчитываемыми для каждого из них. Таким образом, если есть необходимость знать ситуацию не только в текущий момент, но и прогнозировать ее в будущем, нужно внести в формулировку задачи стохастическую составляющую.

В работе анализируется сценарий, при котором пользователи всегда активны (отправляют данные) и движутся в сети округлой формы радиуса R . Направления и траектории, по которым движутся пользователи, берутся из статистических

характеристик имитационного событийного моделирования, что позволяет найти вероятность того, что пользователь изменит область с некоторой MCS в пределах некоторого временного интервала. Зона обслуживания разделена на S непересекающихся областей с одним и тем же уровнем CQI. Предположим, что в зоне обслуживания нет препятствий, а, значит, области будут иметь форму колец.

Области $s = 1, \dots, S-1$ имеют внешний радиус R_s и внутренний радиус R_{s+1} ($R_1 = R$). Область $s = S$ - это круг радиуса R_S .

Пользователи распределяются равномерно по плоскости в соответствии с пуассоновским точечным процессом. В этом случае вероятность того, что пользователь станет активным в области $s \in S$ равна $p_s = (R_s^2 - R_{s+1}^2) / R^2$, $s = 1, \dots, S-1$; $p_s = R_s^2 / R^2$.

Обозначим β_s вероятность наступления события, когда пользователь отдаляется от BS и меняет индекс CQI с s на $s-1$; тогда $\alpha_s = 1 - \beta_s$ - вероятность события, при котором пользователь приближается к BS и меняет CQI с s на $s+1$; а a_s - среднее время, в течение которого пользователь остается в области s , то есть не меняет свой индекс CQI. Значения α_s , β_s и a_s берутся из данных имитационного моделирования.

Таким образом, описанный выше сценарий с фиксированным числом движущихся пользователей моделируется как сеть массового обслуживания с S узлами (соответствующие используемым индексам s -CQI). На каждом узле есть M приборов, что определяет максимальное число UE с одним и тем же значением CQI). Переходы возможны только между соседними узлами, как это показано на рис. 2.2 в схеме сети массового обслуживания.

Пространство состояний системы $X(S, M)$ удовлетворяет соотношению (2.5):

$$X(S, M) = \left\{ m : m_i = 0, 1, \dots, M; \sum_{i=1}^S m_i = M \right\}. \quad (2.5)$$

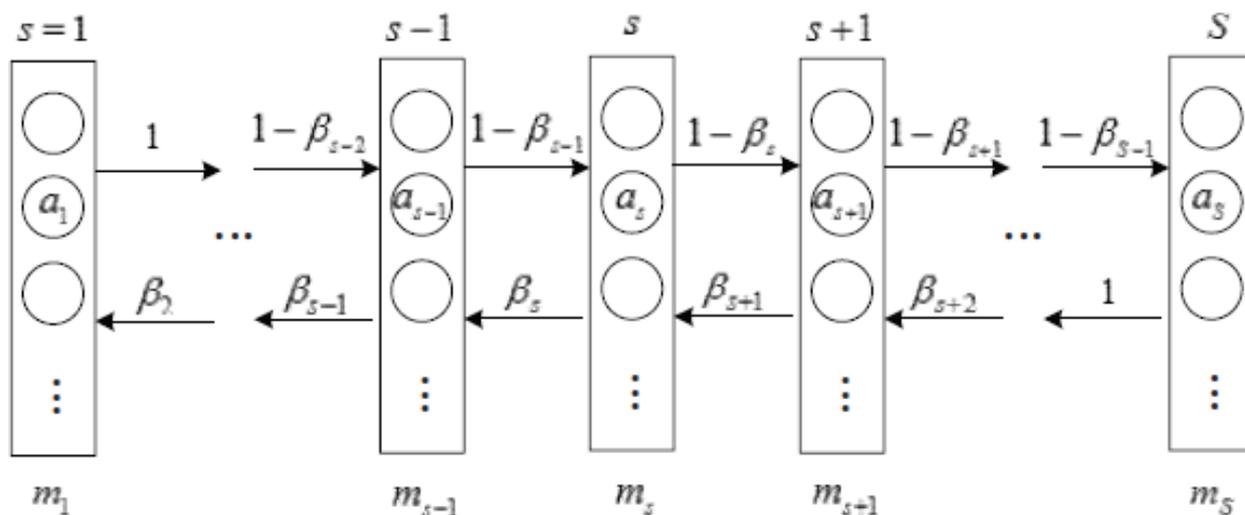


Рис. 2.2. Схема сети массового обслуживания в состоянии $m = (m_1, \dots, m_s)$.

Утверждение 2.2. Среднее число попаданий в область s -CQI рассчитывается по формуле:

$$h_1 = 1, h_2 = \frac{1}{\beta_2},$$

$$h_s = \frac{1}{\beta_s} h_{s-1} - \frac{\alpha_{s-2}}{\beta_s} h_{s-2}, s = 3, \dots, S. \quad (2.6)$$

Утверждение 2.3. Стационарное распределение вероятностей $p(m)$ системы рассчитывается по формуле:

$$p(\mathbf{m}) = G^{-1}(S, M) \prod_{s=1}^S \frac{(h_s a_s)^{m_s}}{m_s!}, \quad (2.7)$$

где $M(t) = (m_1(t), \dots, m_s(t))$,

$$G(S, M) = \sum_{\mathbf{m} \in X(S, M)} \prod_{s=1}^S \frac{(h_s a_s)^{m_s}}{m_s!}, M \geq 1, S > 0. \quad (2.8)$$

Замечание 2.3: Согласно алгоритму Бузена нормировочная константа $G(S, M)$ рассчитывается рекурсивно следующим образом:

$$G(s, m) = \sum_{v=0}^m G(s-1, v) f_s(m-v), s=1, \dots, S, m=0, \dots, M, \quad (2.9)$$

$$G(s, 0) = 1, s=0, \dots, S; G(0, m) = 0, m=1, \dots, M,$$

где

$$f_s(v) = \begin{cases} 1, & m=0, \\ \frac{h_s a_s}{v} f_s(v-1), & v=1, \dots, M. \end{cases} \quad (2.10)$$

Зная стационарное распределение вероятностей $p(m)$ числа пользователей многоадресной рассылки с s-CQI, применим схему формирования оптимальной конфигурации из предложения 1 для расчета максимального ADR $b(m)$ всех пользователей в многоадресной группе и его среднего значения $\bar{b} = \sum_{m \in X(S, M)} p(m) \cdot b(m)$.

Применяя схему из утверждения 1, можно определить оптимальную конфигурацию подгрупп для каждого состояния $m \in X(S, M)$. Как упомянуто выше, в случае если целевой функцией является ADR, поиск оптимальной конфигурации всегда должен выполняться между одной или двумя подгруппами. Таким образом, пространство состояний системы $X(S, M)$ можно разделить на два подмножества:

$$X_1(S, M) = \{\mathbf{m} \in X(S, M) : L = 1\},$$

$$X_2(S, M) = \{\mathbf{m} \in X(S, M) : L = 2\}. \quad (2.11)$$

Таким образом, соответствующие вероятности P_1 и P_2 оптимальной конфигурации с одной и двумя подгруппами рассчитываются следующим образом:

$$P_1 = \sum_{\mathbf{m} \in X_1(S, M)} p(\mathbf{m}), P_2 = \sum_{\mathbf{m} \in X_2(S, M)} p(\mathbf{m}). \quad (2.12)$$

В случае одной подгруппы среднее значение скорости передачи данных для пользователя в этой подгруппе рассчитывается как:

$$\bar{b}_1 = \sum_{m \in X_1(S, M)} b_{s_1}^{\min} N \cdot p(m). \quad (2.13)$$

В случае двух подгрупп средние значения скорости передачи данных для пользователей в первой подгруппе b_2^1 и во второй подгруппе b_2^2 рассчитываются следующим образом:

$$\bar{b}_2^1 = \sum_{m \in X_2(S, M)} b_{s_1}^{\min} \cdot p(m), \quad (2.14)$$

$$\bar{b}_2^2 = \sum_{m \in X_2(S, M)} b_{s_2}^{\min} (N-1) \cdot p(m). \quad (2.15)$$

В первой части раздела сеть массового обслуживания рассматривалась только с «активными» пользователями, то есть абоненты в этом случае постоянно пользуются мобильной сетью. Аналогичным образом, можно описать модель для устройств, работающих в двух режимах («ВКЛ-ВЫКЛ»), где 0-узел описывает пассивное состояние (рис. 2.3).

Здесь «пассивный» узел обозначается как нулевой узел, а N - общее количество запросов к системе, как на активных, так и на пассивных узлах. $\theta_{nm}, m = \overline{1, M}$ представляют вероятности переходов активных пользователей между соседними узлами, а θ_{0m} , где $m = \overline{1, M}$, представляют вероятности переходов от пассивного узла к активным. Среднее время, по истечении которого пользователь покидает область m , обозначается как a_m .

Данная физическая система может существовать, так как пассивный узел находится в одном из достижимых состояний, и, следовательно, удовлетворяет условию нормализации (2.16):

$$\sum_{m=1}^M \theta_{0m} = 1. \quad (2.16)$$

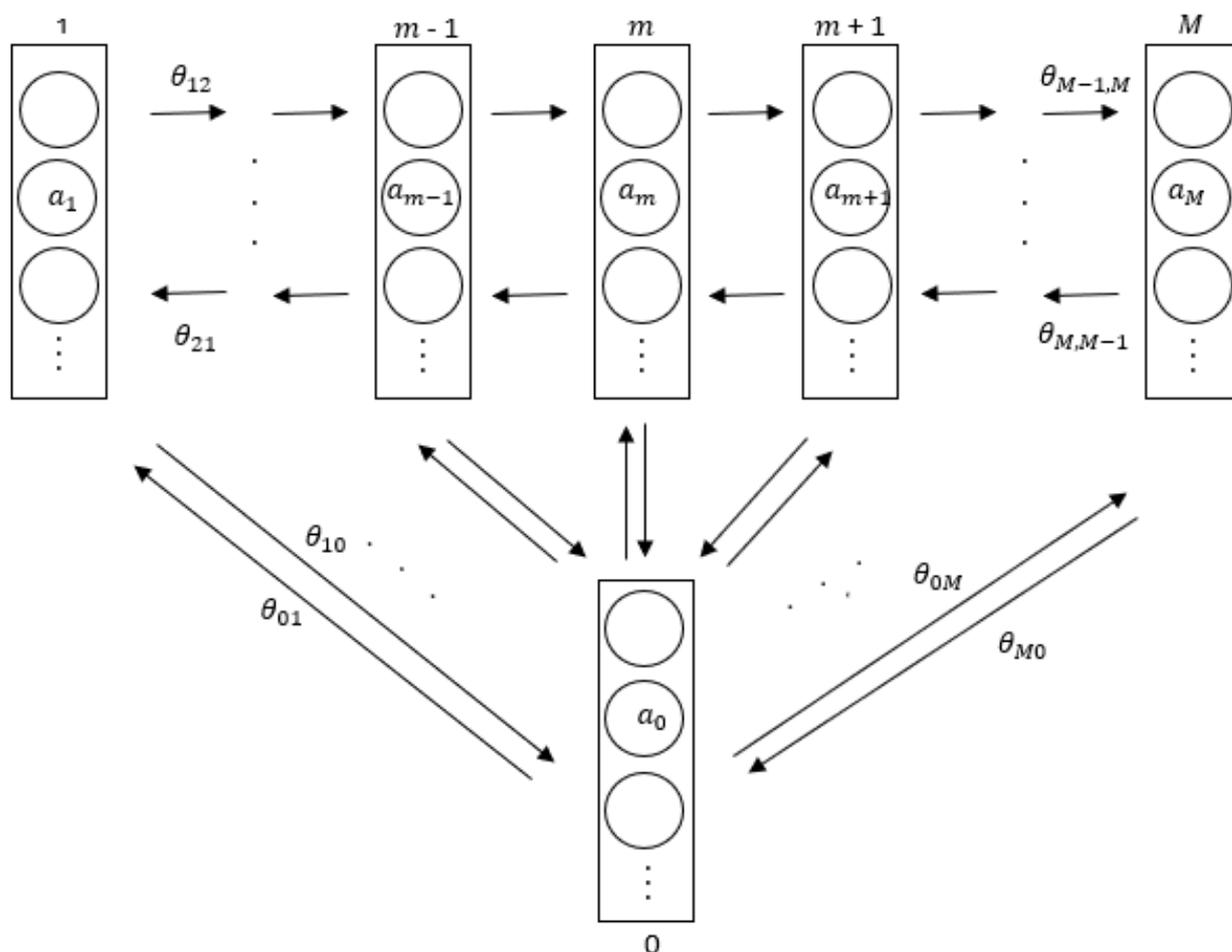


Рис. 2.3. Сеть массового обслуживания для модели «ВКЛ-ВЫКЛ».

Пространство состояний системы $X(M, N)$ удовлетворяет соотношениям (2.5) и (2.17):

$$|X(M, N)| = X := \binom{M + N - 1}{M - 1}, M \geq 0, N \geq 0 \quad (2.17)$$

Утверждение 2.4. Стационарные вероятности $p(n)$ состояний системы с пассивным узлом рассчитываются как (2.7), где

$G(M, N) = \sum_{n \in X(M, N)} \prod_{m=1}^M \frac{(h_m a_m)^n m}{n_m!}$, а $h_m, m \in M$ являются решением системы уравнений (2.18):

$$\begin{cases} h_1 = h_2\theta_{21} + h_0\theta_{01}, \\ h_m = h_{m-1}\theta_{m-1} + h_{m+1}\theta_{m+1} + h_0\theta_{0m}, 2 \leq m \leq M-1, \\ h_M = h_{M-1}\theta_{M-1,M} + h_0\theta_{0M}. \end{cases} \quad (2.18)$$

Помимо методов формирования многоадресных подгрупп [108], в качестве традиционного решения по распределению радиоресурсов используется традиционная многоадресная схема (CMS). Согласно этой схеме все члены многоадресной группы обслуживаются с одинаковой скоростью передачи данных, поддерживаемой приемником с наихудшим уровнем CQI. Более низкая эффективность CMS по сравнению с техникой подгрупп будет продемонстрирована в численном анализе.

2.3. Анализ вероятностных характеристик и задача оптимизации схемы распределения радиоресурсов

В рамках исследования рассматривается алгоритм решения задачи нахождения оптимального числа подгрупп и оптимального распределения ресурсных блоков между ними. В качестве целевой функции задачи оптимизации выбрана суммарная скорость передачи данных всеми пользователями соты.

Рассмотрим соту беспроводной сети с числом пользователей, равным N . Положим, что все пользователи соты всегда находятся в активном режиме передачи данных. У базовой станции соты в течение одного временного слота есть в распоряжении K ресурсных блоков.

На первом шаге из множества уровней CQI S удаляются те, на которых нет ни одного пользователя, и затем из оставшихся в качестве начального уровня для первой подгруппы $s_1(\mathbf{n})$ берется наименьший, т.е.:

$$s_1(\mathbf{n}) := \min \{s \in S(\mathbf{n})\}. \quad (2.19)$$

Затем методом простого перебора находится максимальная суммарная скорость передачи данных (ADR) для второй подгруппы. Перебор производится для всех возможных диапазонов CQI уровней: со второго по последний, с третьего по последний и т.д. Из всех полученных значений ADR для второй подгруппы

выбирается максимальное, а в качестве начального уровня для второй группы $s_2(\mathbf{n})$ берется наименьший CQI уровень из соответствующего диапазона:

$$s_2(\mathbf{n}) := \arg \max \left\{ s \in \mathcal{S}(\mathbf{n}) \setminus \{s_1(\mathbf{n})\} : b_s \sum_{i \geq s} n_i \right\}, \quad (2.20)$$

где b_s – скорость передачи данных, соответствующая s -му уровню CQI для одного ресурсного блока. Таким образом формируются две потенциальные подгруппы мультивещания:

$$S_1(\mathbf{n}) := \{s \in \mathcal{S}(\mathbf{n}) : s < s_2(\mathbf{n})\}, \quad (2.21)$$

$$S_2(\mathbf{n}) := \{s \in \mathcal{S}(\mathbf{n}) : s \geq s_2(\mathbf{n})\}, \quad (2.22)$$

где $S_1(\mathbf{n}) \cup S_2(\mathbf{n}) = \mathcal{S}(\mathbf{n})$.

На заключительном шаге сравниваются ADR для первой и второй подгруппы и принимается решение о целесообразности разбиения группы мультивещания на две подгруппы:

$$B_l(\mathbf{n}) := b_{s_l(\mathbf{n})} \sum_{s \in S_l(\mathbf{n})} n_s, l = 1, 2. \quad (2.23)$$

Условия формирования одной или двух подгрупп мультивещания, а также расчет максимальной суммарной скорости передачи данных можно представить в виде (2.24) и (2.25) соответственно:

1. Если $B_1(\mathbf{n}) > B_2(\mathbf{n})$, тогда

$$\begin{cases} b(\mathbf{n}, L, \sigma, \mathbf{k}) = K \cdot b_{s_1(\mathbf{n})} \cdot N, \\ L = 1, \\ \sigma = \{\mathcal{S}(\mathbf{n})\}, \\ k_1 = K, \\ B_1 = b_{s_1(\mathbf{n})}; \end{cases} \quad (2.24)$$

2. Если $B_1(\mathbf{n}) \leq B_2(\mathbf{n})$, тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} b(\mathbf{n}, L, \sigma, \mathbf{k}) = 1 \cdot B_1(\mathbf{n}) + (K - 1) \cdot B_2(\mathbf{n}), \\ L = 2, \\ \sigma = \{S_1(\mathbf{n}), S_2(\mathbf{n})\}, \\ k_1 = 1, k_2 = K - 1, \\ B_1 = b_{s_1(\mathbf{n})}, B_2 = b_{s_2(\mathbf{n})}. \end{array} \right. \quad (2.25)$$

Алгоритм был представлен в [100], где также приведено обоснование того факта, что оптимальное число подгрупп мультивещания не может превышать двух. Данное утверждение позволяет алгоритму быть достаточно эффективным при работе с реальными данными, даже несмотря на то, что в алгоритме используется простой перебор. Помимо этого, показано, что максимальная ADR достигается при выделении максимального числа ресурсных блоков $(K - 1)$ второй подгруппе, что отражено в расчете этой характеристики в (2.25).

На основе рассмотренного алгоритма проведен анализ зависимости ADR от числа пользователей соты и количества ресурсных блоков, находящихся в распоряжении у базовой станции соты. Для нахождения среднего значения ADR проводилось по $t = 100$ испытаний для выбранных значений параметра распределения числа устройств ρ и для фиксированного числа ресурсных блоков K .

Для численного эксперимента было использовано случайное распределение устройств на плоскости в соответствии с пуассоновским точечным процессом.

Для анализа характеристик системы было проведено имитационное моделирование в среде моделирования MATLAB в соответствии с рекомендациями в [1]. Система LTE использует мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) в качестве схемы модуляции, поддерживая методы множественного доступа с частотным разделением каналов с одной несущей (англ. Single Carrier FDMA, SC-FDMA) и методики множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (англ. Orthogonal frequency-division multiple access, OFDMA)

в восходящей линии связи и нисходящей линии связи соответственно. В схеме на основе OFDM данные передаются через блоки ресурсов (RB). Каждый RB является подканалом 180 кГц, состоящим из 12 последовательных поднесущих, разнесенных на 15 кГц. В частотной области RB является наименьшей единицей частоты, которая должна быть выделена пользовательскому оборудованию (UE); тогда как во временной области RB назначается каждый интервал времени передачи ($TPI = 1$ мс).

Рассмотрим следующие сценарии:

1. В сценарии «А» рассматривается число UE равное 10, а количество RB при этом варьируется от 6 до 100.
2. В сценарии «Б» число UE варьируется от 10 до 100, а количество RB фиксировано и равно 25.

UE свободно перемещаются внутри соты в соответствии с одной из моделей движения: Random Walk [32] или Lévy Flight [49].

Показатели производительности, используемые для анализа метода выделения многоадресных подгрупп, перечислены ниже:

1. Совокупная скорость передачи данных (ADR) — это общая скорость передачи данных, которую достигают все пользователи вместе.
2. Вероятность выбора одной подгруппы — это вероятность того, что после применения алгоритма будет организована только одна многоадресная подгруппа.
3. Вероятность выбора двух подгрупп — вероятность того, что будут сформированы две многоадресные подгруппы.
4. Средняя скорость передачи данных для одной подгруппы — это средняя скорость передачи данных, достигаемая пользователем в случае формирования только одной подгруппы.
5. Средняя скорость передачи данных для двух подгрупп — это скорость передачи данных, которую пользователи достигают в среднем при условии формирования двух подгрупп.

Для анализа вышеописанных характеристик было выполнено число испытаний имитационного моделирования, обеспечивающее достоверность результатов с доверительным интервалом 95%.

Сценарий «А»: проводится анализ производительности с точки зрения достижимой ADR, показанной на рис. 2.4. Как и ожидалось, ADR растет с увеличением количества доступных RB как для модели Levy Flight, так и для Random Walk. Здесь ADR варьируется от 5,35 Мбит/с до 89,18 Мбит/с для Levy Flight; в то время как диапазон ADR для Random Walk составляет от 3,44 Мбит/с до 57,62 Мбит/с.

На рис. 2.5 и рис. 2.6 показаны вероятность формирования только одной подгруппы и вероятность формирования двух подгрупп соответственно.

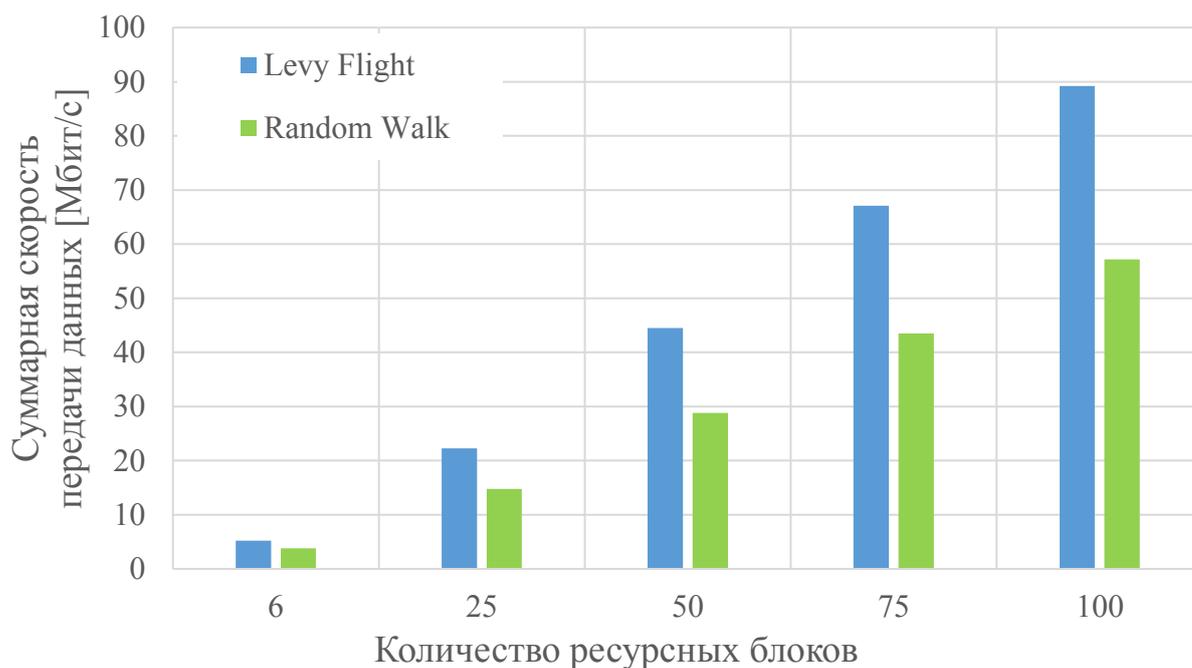


Рис. 2.4. Совокупная скорость передачи данных в зависимости от количества доступных RB.

Стоит отметить, что вероятность формирования только одной подгруппы очень мала по сравнению с вероятностью двух подгрупп, особенно для модели Levy Flight (среднее значение которой составляет 0,064). Очевидно, вероятность формирования двух подгрупп для Levy Flight выше, чем для Random Walk. (0,96 и 0,85 соответственно).

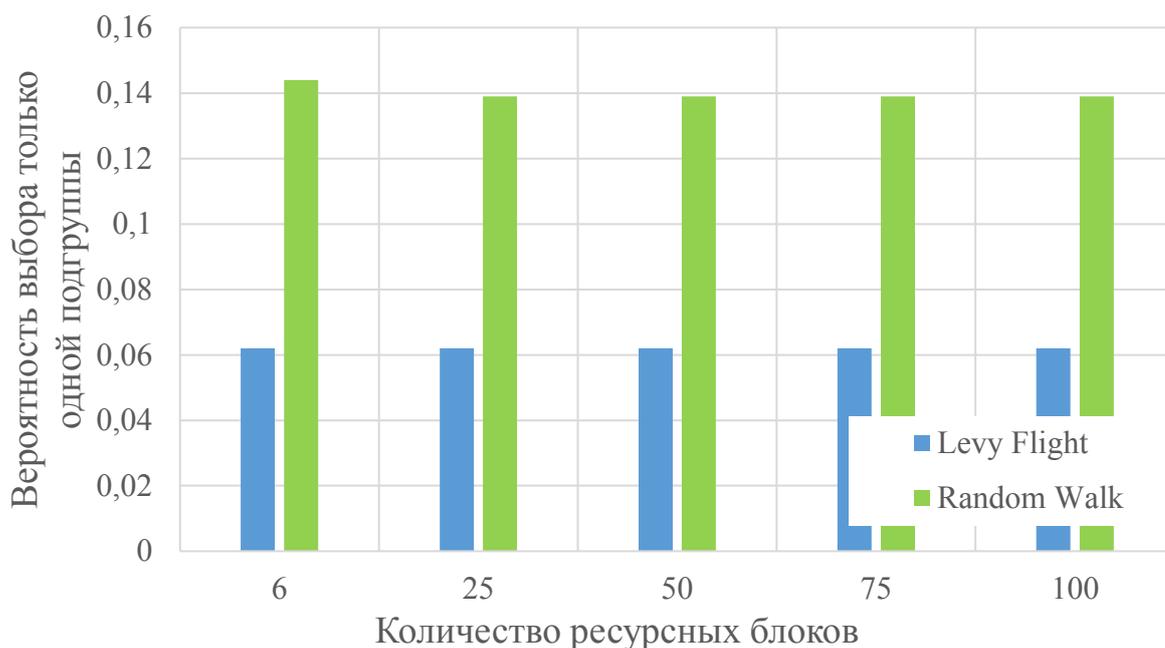


Рис. 2.5. Вероятность формирования одной подгруппы в зависимости от количества доступных RB.

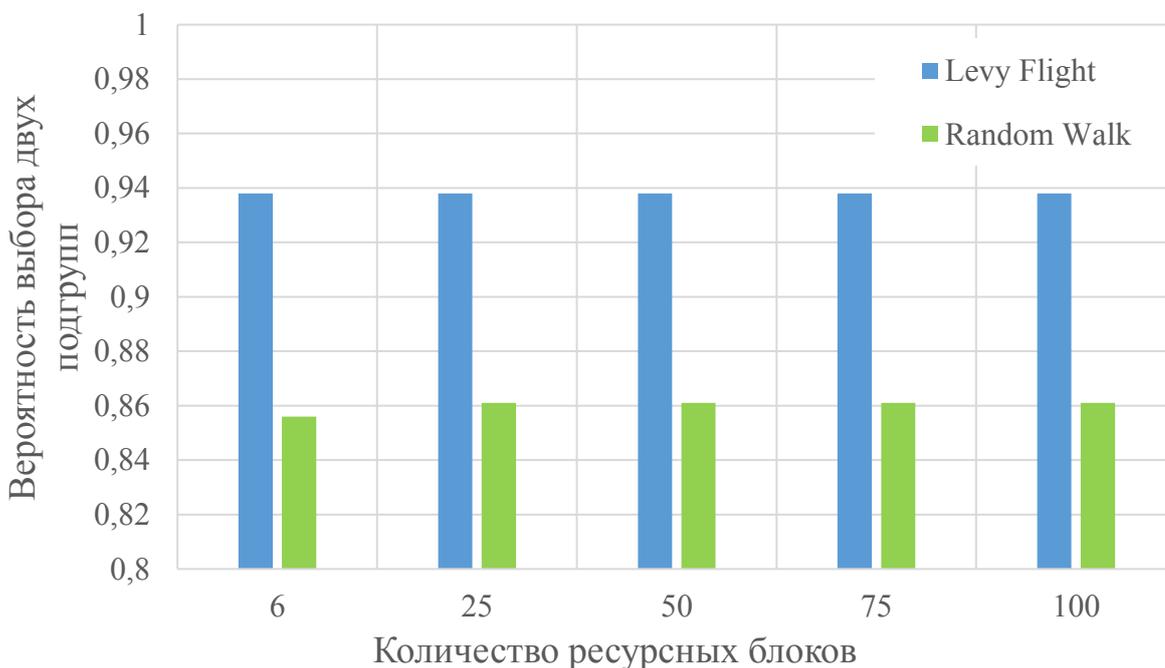


Рис. 2.6. Вероятность формирования двух подгрупп в зависимости от количества доступных RB.

С точки зрения средней скорости передачи данных, которую достигают пользователи, принадлежащие только к одной подгруппе (рис. 2.7), очевидно, что она демонстрирует то же поведение, что и ADR. Для Levy Flight она находится в

пределах от 0,59 Мбит/с до 9,9 Мбит/с; тогда как для Random Walk она варьируется от 0,3 Мбит/с до 5,3 Мбит/с.

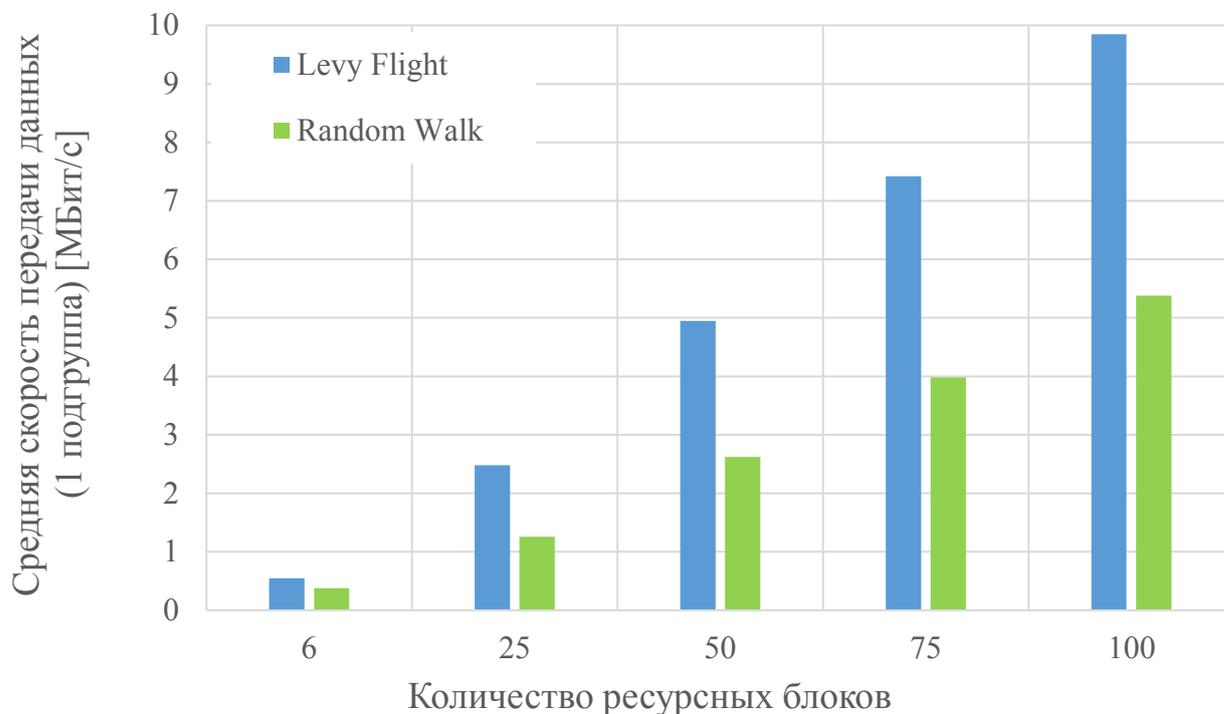


Рис. 2.7. Средняя скорость передачи данных для одной подгруппы в зависимости от количества доступных RB.

На рис. 2.8 показана средняя скорость передачи для конфигурации с двумя подгруппами. Такая конфигурация позволяет добиться лучшего QoE для пользователей с более высоким качеством канала, по сравнению с конфигурацией с одной подгруппой. Для двух подгрупп количество RB разделяется между обеими подгруппами, чтобы позволяет избежать избыточной растраты ресурсов на пользователей с плохим качеством сигнала. Та же тенденция просматривается и для ADR. Средняя скорость передачи данных варьируется от 0,55 Мбит/с до 9,32 Мбит/с и от 0,49 Мбит/с до 8,32 Мбит/с для Levy Flight и Random Walk, соответственно.

Сценарий «Б»: в этом сценарии варьируется число UE в многоадресной группе. Как и ожидалось, ADR, показанный на рис. 2.9, увеличивается с ростом числа UE как для Levy Flight, так и для Random Walk. Его среднее значение составляет 45,57 Мбит/с и 29,48 Мбит/с для Levy Flight и Random Walk,

СООТВЕТСТВЕННО.

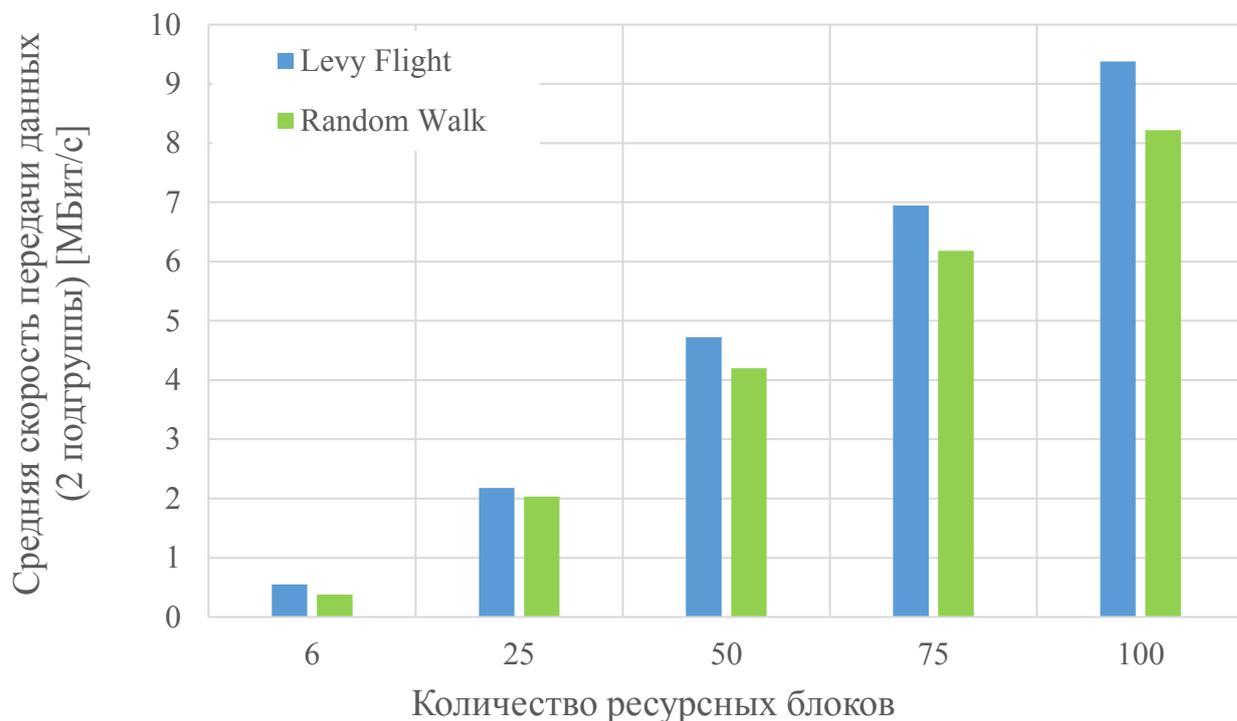


Рис. 2.8. Средняя скорость передачи данных для двух подгрупп в зависимости от количества доступных RB.

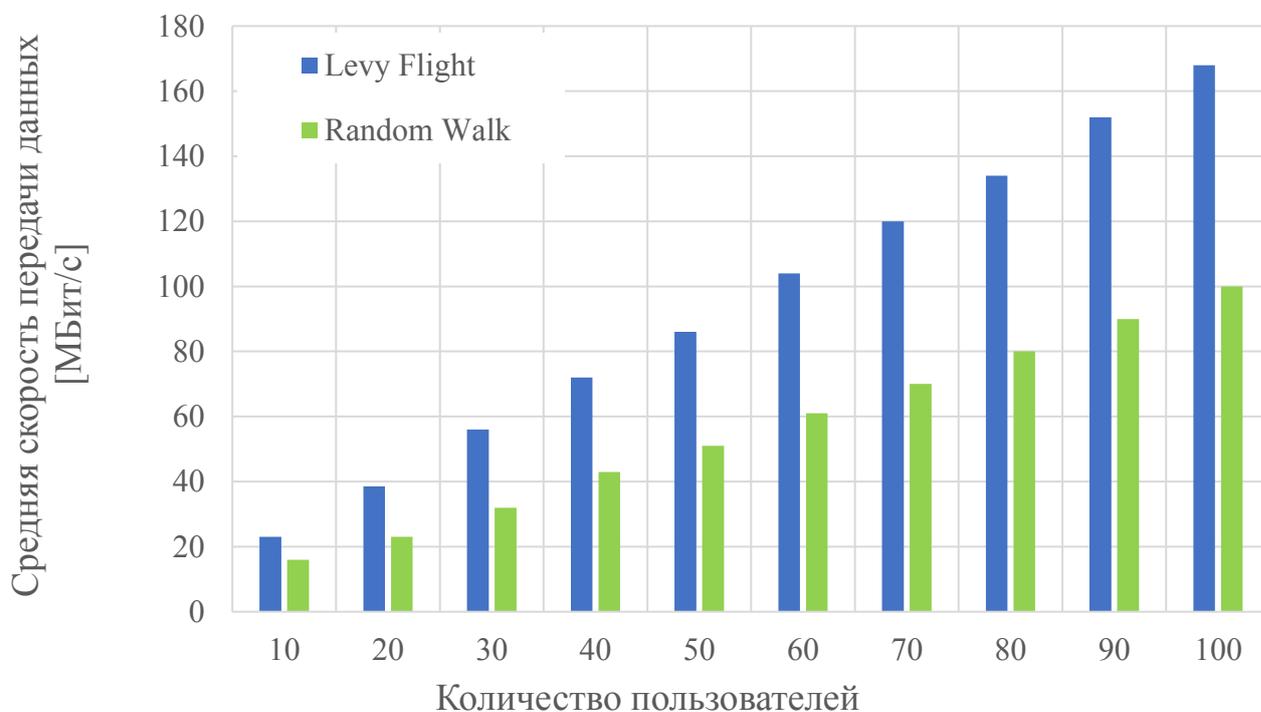


Рис. 2.9. Совокупная скорость передачи данных подгруппы в зависимости от количества UE.

На Рис. 2.10 показана вероятность формирования только одной подгруппы, которая очень мала. В частности, стоит отметить, что вероятность формирования только 1 подгруппы равна 0 для обеих моделей движения, когда количество UE в соте группа составляет более 40.

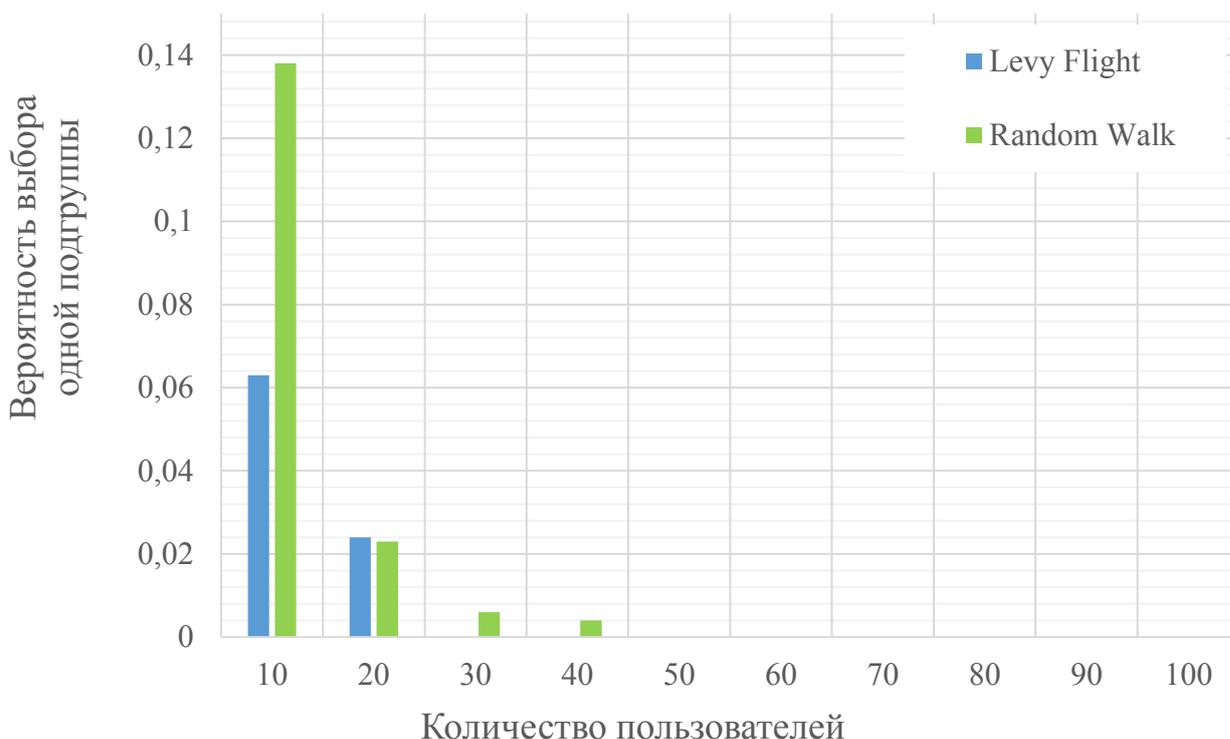


Рис. 2.10. Вероятность формирования одной подгруппы в зависимости от количества UE.

На рис. 2.11 показана вероятность формирования двух подгрупп. Очевидно, что чем ниже вероятность формирования только одной группы, тем выше вероятность формирования двух подгрупп.

Для модели Random Walk средняя скорость передачи варьируется от 1,32 Мбит/с до 0,62 Мбит/с при наличии относительно небольшого число UE (от 10 до 40). Уменьшение скорости с ростом числа UE связано с тем, что вероятность наличия по крайней мере одного пользователя с плохим состоянием канала становится выше. В то же время для Levy Flight средняя скорость передачи равна нулю для группы многоадресной рассылки, состоящей из более чем 20 UE.

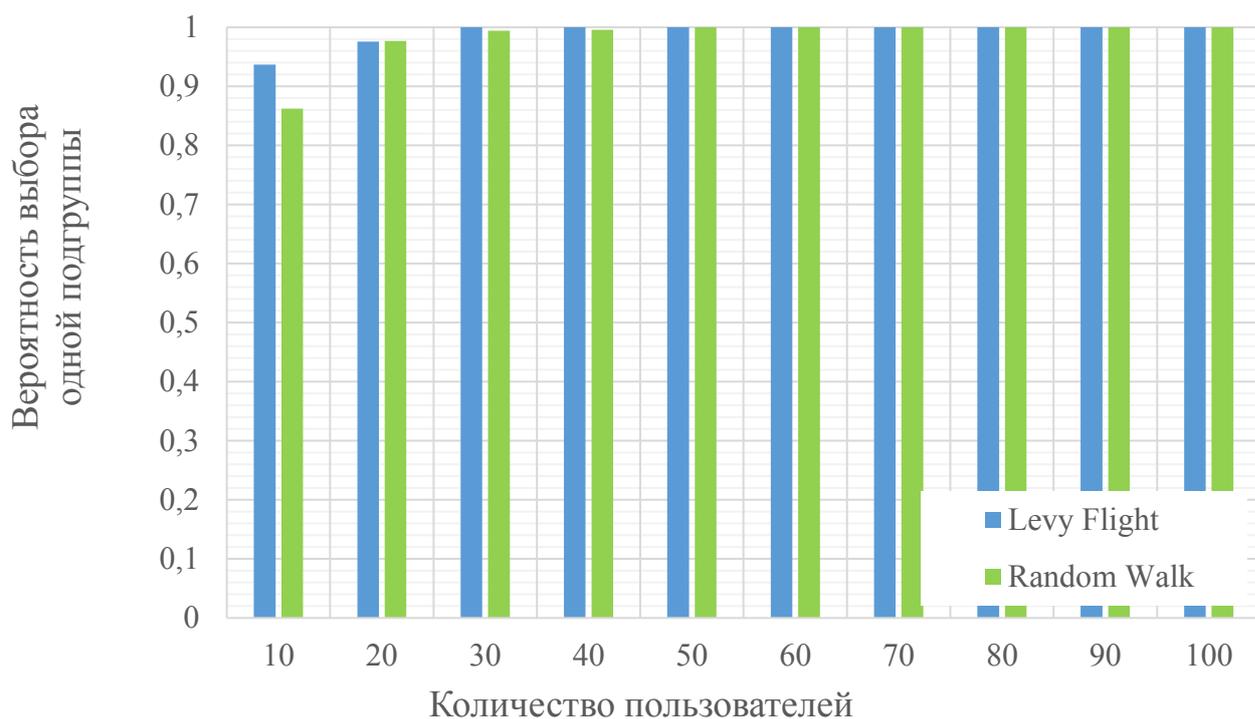


Рис. 2.11. Вероятность формирования двух подгрупп в зависимости от числа UE.

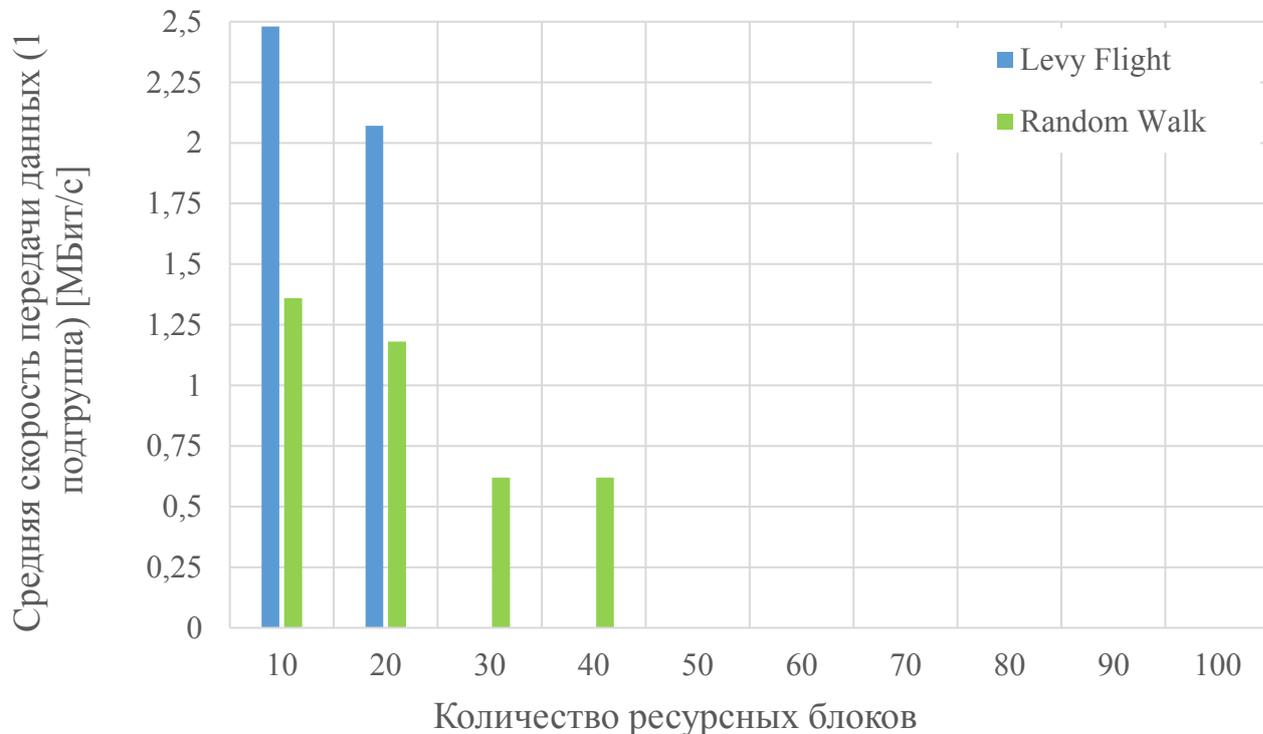


Рис. 2.12. Средняя скорость передачи данных для одной подгруппы в зависимости от числа UE.

На рис. 2.13 показана средняя скорость передачи для конфигурации с двумя

подгруппами. По мере того как увеличивается число UE в группе многоадресной рассылки и, соответственно, растёт вероятность наличия UE с более низким качеством канала, средняя скорость передачи уменьшается как для Levy Flight, так и для Random Walk. В первом случае она варьируется от 2,3 Мбит/с до 1,7 Мбит/с, а во втором – от 2 Мбит / с до 1,25 Мбит/с.

Для численных экспериментов использованы те же входные параметры, что и для имитационного моделирования. Однако в случае сети массового обслуживания невозможно учесть реальную топологию сети. Это значит, что для аналитического моделирования необходимо иметь значения параметров, которые могут быть получены только с помощью имитатора.

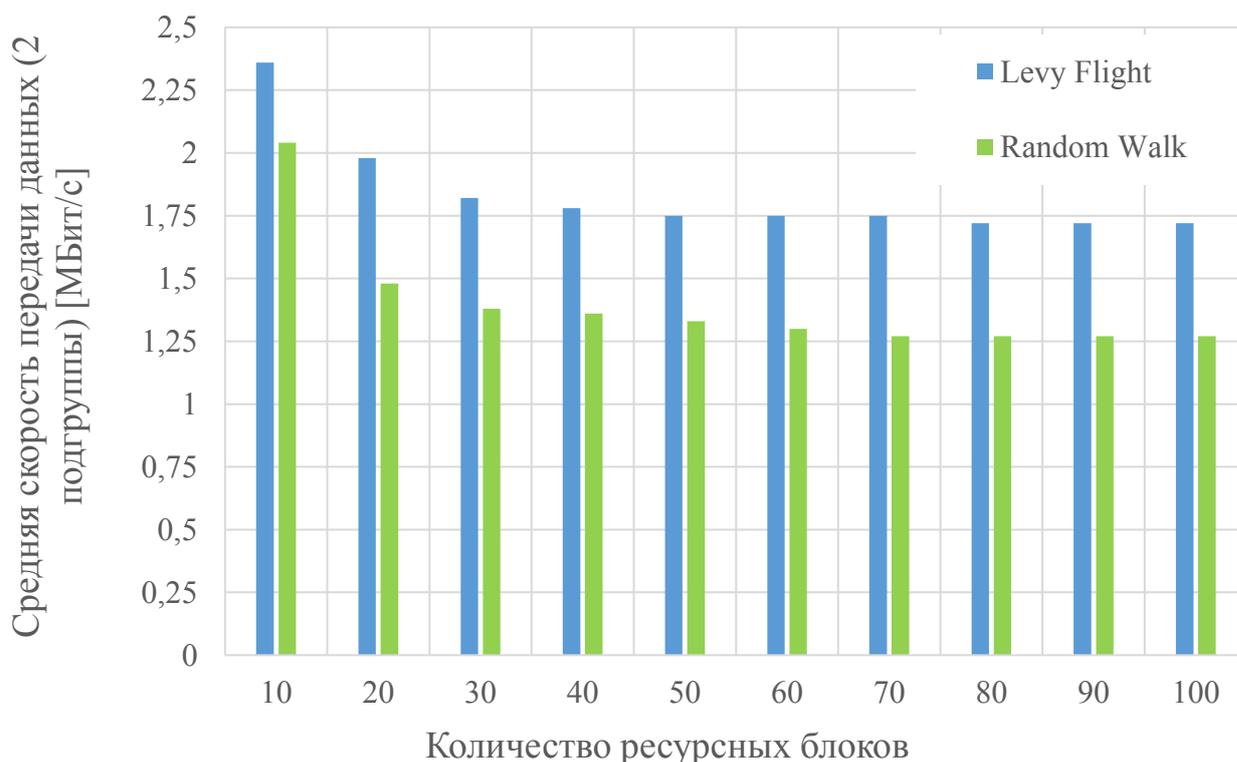


Рис. 2.13. Средняя скорость передачи данных для двух подгрупп в зависимости от числа UE.

Для рассматриваемых моделей перемещения в пределах зоны обслуживания, которая для упрощения разделена на 5 колец с одним и тем же CQI, используются исходные значения, представленные в таблице 2.1.

Численный эксперимент показал довольно точное соответствие результатов,

полученных с помощью аналитической и имитационной моделей, с относительной разницей, не превышающей пяти процентов. Поскольку число возможных UE m , обслуживаемых с различными CQI, равно M^S , оно растет экспоненциально с ростом числа доступных индексов S . По этой причине численный анализ с помощью аналитической модели имеет смысл проводить только для сценариев, в которых не более 50 UE.

Таблица 2.1. Входные параметры для моделирования перемещения пользователей.

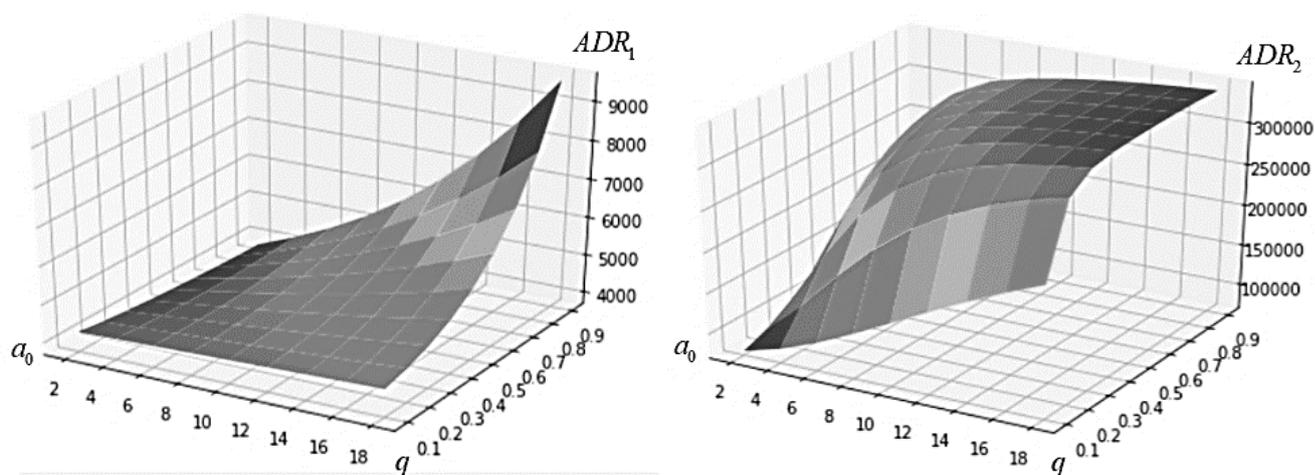
l	b_s Кбит/с	Lévy Flight			Random Walk		
		α_s	b_2^1	a_s с	α_s	b_2^1	a_s с
1	25,59	1	0	16,71	1	0	19,58
4	101,07	0,476	0,524	10,24	0,481	0,518	11,65
8	321,57	0,398	0,601	8,61	0,474	0,526	9,19
12	655,59	0,362	0,637	8,53	0,403	0,597	10,45
15	933,19	0	1	1,64	0	1	2,63

Суммарная скорость передачи данных показывает общий размер данных, которые могут быть загружены устройствами в пределах одного TTI, что чрезвычайно важно для приложений, которые используют передачу потокового видео и, следовательно, требуют более высокой пропускной способности.

На рис. 2.14 представлены результаты численного примера для анализа суммарной скорости передачи данных (ADR), полученных с помощью предложенной модели «ВКЛ-ВЫКЛ»: на рис. 2.14 (а) показаны результаты для многоадресной передачи без выделения подгрупп, тогда как на рис. 2.14 (б) представлены результаты для многоадресной передачи с выделением подгрупп [18].

В зависимости от технологий прикладного уровня и потребностей пользователей, может применяться один из трех методов максимизации соответствующей целевой характеристики: суммарная скорость передачи данных

(ADR), сбалансированная скорость передачи данных (англ. Balanced Data Rate, BDR) и усредненная скорость передачи данных (англ. Fair Data Rate, FDR) [106].



(а)

(б)

Рис. 2.14. ADR для модели «ВКЛ-ВЫКЛ»: без подгруппы (а) и с подгруппой (б).

FDR пытается минимизировать разницу в скоростях между самыми «медленными» и «быстрыми» группами пользователей:

$$\begin{aligned}
 U_1(\sigma = \{S_1, \dots, S_L\}, k = (k_1, \dots, k_L)) &= \\
 &= \max_{1 \leq l \leq L} (b_{\min(s)} * k_l) - \min_{1 \leq l \leq L} (b_{\min(s)} * k_l) \rightarrow \min. \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

BDR же максимизирует минимальную скорость без учета групп с более высокими скоростями (2.27):

$$\begin{aligned}
 U_2(\sigma = \{S_1, \dots, S_L\}, k = (k_1, \dots, k_L)) &= \\
 &= \min_{1 \leq l \leq L} (b_{\min(s)} * k_l) \rightarrow \max. \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

PF максимизирует общую пропускную способность сети и равномерно распределяет скорости (2.28) [48]:

$$\begin{aligned}
 U_3(\sigma = \{S_1, \dots, S_L\}, k = (k_1, \dots, k_L)) &= \\
 &= \sum_{1 \leq l \leq L} (\log(b_{\min(m)} * k_l) * \sum_{s \in S_l} n_s) \rightarrow \max. \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

Проанализируем предложенные функции, используя индекс справедливости Джейн, значение которого определяется по формуле (2.29):

$$J = \frac{(\sum_{l=1}^L (b_{\min(s)} * k_l * \sum_{s \in S_l} n_s))^2}{N + \sum_{l=1}^L ((b_{\min(s)} * k_l)^2 * \sum_{s \in S_l} n_s)}, \quad 0 \leq J \leq 1, \quad (2.29)$$

где 0 означает, что скорости распределены плохо, а 1 - наилучшим образом.

В таблице 2.2 численные результаты показывают, что в случае равномерного и центрированного распределения пользователей по зоне обслуживания функция FDR позволяет найти наилучшую конфигурацию сети.

Таблица 2.2. Численные результаты для функций FDR, BDR и PF.

Распределение пользователей	FDR	BDR	PF
Равномерное	0.95	0.89	0.77
Центрированное	0.98	0.96	0.89
Пограничное	0.75	0.96	1.00

Но в случае, если пользователи распределены в основном по границам соты, PF демонстрирует гораздо большую эффективность. Если пользователи ведут себя таким образом, что они находятся в основном либо ближе к центру, либо к границам, предпочтительным решением является BDR.

Подводя итог изложенного в данном разделе, можно с уверенностью говорить о том, что результаты численного анализа четко указывают на положительный эффект от метода выделения подгрупп для рассматриваемых моделей перемещения с точки зрения суммарной скорости передачи и общей пропускной способности сети.

ГЛАВА 3

МОДЕЛЬ РЕСУРСНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА ОДНОАДРЕСНЫХ И МНОГОАДРЕСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3.1. Системная модель блокировки прямой видимости в высокочастотной сети

Ожидается, что технология беспроводного доступа 3GPP New Radio (NR) станет основой систем 5G, обеспечивающих исключительно высокие скорости передачи данных на интерфейсе радиодоступа. Передача данных в таких системах будет вестись в миллиметровом диапазоне длин волн, особенностью которого является необходимость прямой видимости между устройствами, участвующими в соединении. Одной из задач в сетях, построенных на основе миллиметровых точек доступа, является задача нахождения оптимального расположения точек доступа для обеспечения зоны покрытия сети устойчивой связью.

Новая технология радиодоступа 3GPP New Radio (NR), стандартизируемая в настоящее время консорциумом 3GPP [52], в ближайшее время займет ключевое место среди технологий систем мобильной связи пятого поколения. Системы NR функционируют в миллиметровом диапазоне частот, и в перспективе позволят достигать высоких скоростей передачи до нескольких гигабит в секунду, и в то же время значительно меньших задержек на уровне радиоканала по сравнению с современными системами четвёртого поколения. В настоящее время операторы сетей и поставщики телекоммуникационных услуг уже проводят испытания этой технологии в условиях, приближенных к реальным [84], и перед исследовательским сообществом встаёт ряд новых задач, требующих методов анализа производительности, целесообразности и возможности внедрения тех или иных услуг в системах 5G NR [59, 80].

Системы 5G NR не только позволяют достичь новых уникальных возможностей, но и вместе с этим ставят перед проектировщиками телекоммуникационных сетей множество трудноразрешимых задач, среди которых

можно отметить гораздо более высокие потери качества канала по сравнению со связью на основе микроволновых диапазонов, блокировка радиолучей небольшими подвижными объектами, необходимость в эффективных механизмах управления лучом и т.д. [78, 79, 95]. В реальных же условиях наибольшие трудности системам 5G NR в большинстве случаев приносят подвижные препятствия, такие как люди и транспортные средства, которые являются блокираторами распространения радиосигнала [46, 53, 97].

В случае если пользовательское оборудование временно попадает в состояние блокировки радиосигнала некоторым объектом, то в зависимости от среды распространения сигнала и расстояния между устройством и базовой станцией NR BS (англ. New Radio Base Station) это устройство может либо выпасть из зоны покрытия BS, либо понизить свою схему модуляции и кодирования таким образом, чтобы вероятность ошибки на уровне канала не превышала заранее определенного целевого значения [8]. Недавно консорциум 3GPP предложил возможное решение проблемы выхода из зоны покрытия, которое заключается в механизме «множественных соединений» (англ. multiconnectivity). При использовании этого принципа одновременно поддерживается несколько активных каналов связи устройства с соседними NR BS, и в случае возникновения блокиратора радиосигнала соединение передается на одну из них [7]. В условиях блокировки для того, чтобы поддерживать требуемую скорость передачи через основную и через резервную базовые станции, необходимо большее количество физических ресурсов. Если для поддержания требуемой скорости радио ресурсов недостаточно, то либо текущая сессия сбрасывается, либо услуга продолжается предоставляется с более низкой скоростью соединения, если это предусмотрено соглашением об уровне обслуживания (англ. Service Level Agreement, SLA) [59, 68].

Анализ производительности высокочастотных систем, обслуживающих трафик одноадресных соединений, к данному моменту неоднократно проводился исследователями с использованием методов теории массового обслуживания и

стохастической геометрии, [41, 51, 79, 80, 124]. Однако, поддержке многоадресных соединений в подобных системах, насколько известно автору, до сих пор уделялось мало внимания. В частности, в [44, 58, 76, 29] авторами рассматриваются алгоритмы оптимизации для поддержки многоадресной передачи в высокочастотной системе, обслуживающих только трафик многоадресной передачи. В единственной известной автору работе [93], в которой рассматривается совместное обслуживание трафика одноадресных и многоадресных соединений, предлагается достаточно простая аналитическая модель обслуживания, а также сделан вывод о достижимости баланса между показателями эффективности для одноадресных и многоадресных сессий и числом элементов в антенне, применяемой в базовой станции. В частности, для оптимизации процесса обслуживания многоадресных сессий, необходимо максимально расширить зону покрытия одного элемента антенны, что в значительной степени сокращает общую зону покрытия одной базовой станции.

Рассмотрим работу базовой станции 5G NR, обслуживающей сессии комбинации одноадресного и многоадресного типов трафика – целевая BS на

рис. 3.1. В момент поступления запроса на установление соединения для предоставления услуги основной для пользователя является та базовая станция, с которой возможно наиболее высокое качество в радиоканале в условиях прямой видимости (англ. Line of Sight, LoS). В большинстве случаев, такая базовая станция расположена ближе других к пользовательскому оборудованию. В случае перехода в состояние отсутствия прямой видимости (англ. non-Line of Sight, nLoS) сессия проходит процесс хэндовера: контроллер базовой станции пытается передать соединение на соседнюю BS, которая обеспечивает лучшее качество канала и при этом имеет достаточный свободный ресурс для дальнейшего обслуживания соединения. Каждая базовая станция имеет зону обслуживания, которую можно представить в виде круга радиуса R , рассчитываемого исходя из выбранной модели распространения волн миллиметровой длины и набора схем модуляции и кодирования MCS.

В модели предполагается, что пользователи распределены по зоне покрытия случайным образом в соответствии с пуассоновским точечным процессом с параметром ρ . Поступление пользовательских запросов на установление соединений с базовой станцией в этом случае является пуассоновским процессом с

$$\Lambda^{r,t} = \lambda^{r,t} \rho^t \pi r^2, \quad \Lambda^{R,t} = \lambda^{R,t} \rho^t \pi (H^2 - r^2) \quad \text{и}$$

$\Lambda^{H,t} = \lambda^{H,t} \rho^t \pi (R^2 - H^2)$, где $(\lambda^t)^{-1}$ – средняя длительность экспоненциально распределенных интервалов между двумя последовательными поступлениями запросов от одного пользователя, а параметр ρ^t описывает плотность расположения пользователей. Здесь индекс $t \in \{U, M\}$ обозначает тип поступающих запросов – одноадресные и многоадресные соответственно.

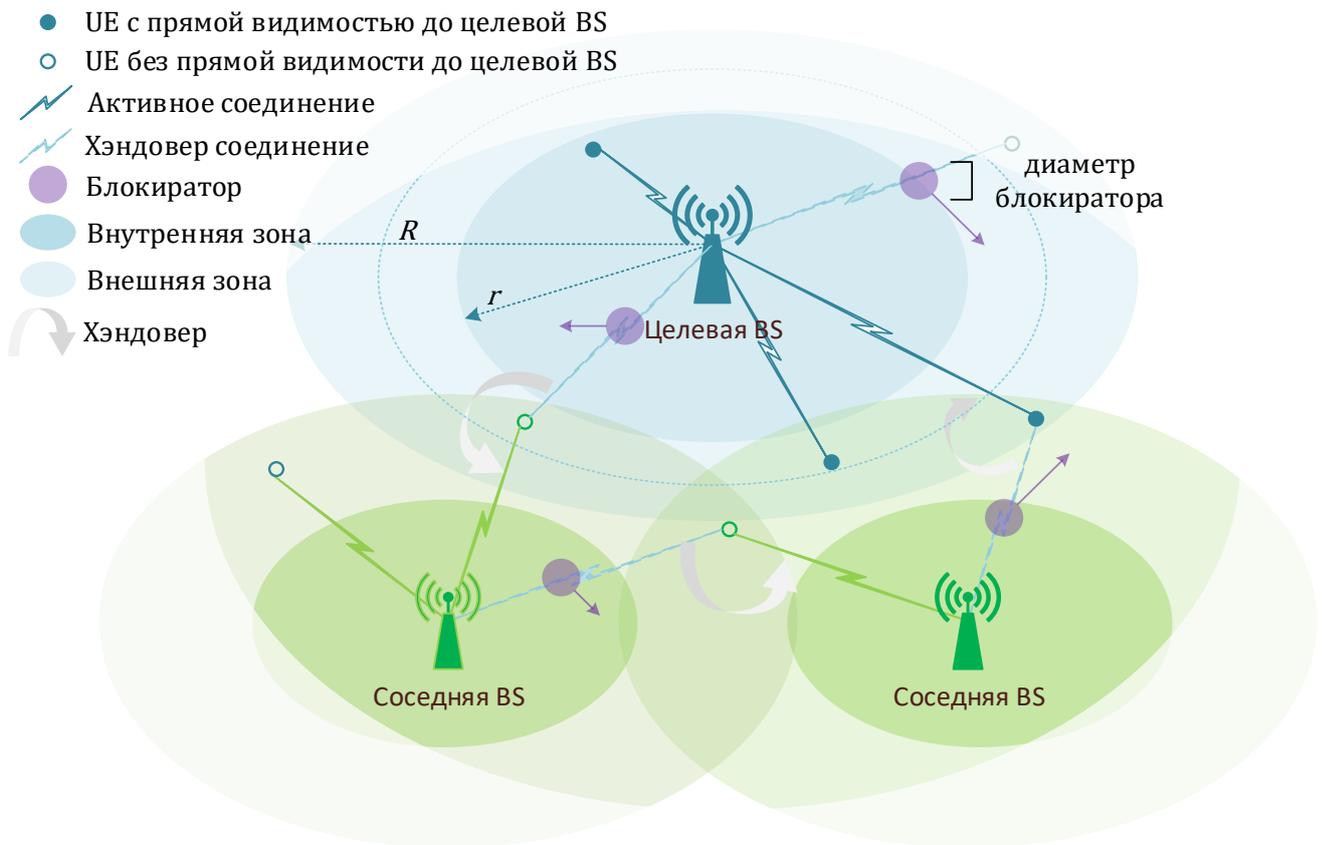


Рис. 3.1. Модель установления соединений.

Для обслуживания пользовательского запроса BS выделяет радиочастотный ресурс, размер которого в общем случае является случайной величиной и

определяется местоположением UE. Согласно [4], затухание радиосигнала в пространстве L_{dB} определяется следующими уравнениями:

$$L_{dB}(x) = \begin{cases} 32,4 + 21\log(x) + 20\log f_c, & \text{при прямой видимости,} \\ 47,4 + 21\log(x) + 20\log f_c, & \text{без прямой видимости,} \end{cases} \quad (3.1)$$

где f_c - рабочая частота, измеряемая в ГГц, x - расстояние между BS и UE. Из этих уравнений можно вычислить расстояния d_{LoS}^E и d_{nLoS}^E , при которых соединение всё ещё может быть установлено в условиях прямой видимости (LoS) и в условиях без прямой видимости (nLoS) соответственно. Для этого достаточно задать пороговое значение L_{dB} как минимальное допустимое значение соотношений сигнал-шум (англ. Signal-to-Noise Ratio, SNR), необходимое для успешного установления соединения.

В предложенной модели учитывается возможность появления блокираторов прямой видимости для пользователей по всей зоне обслуживания базовой станции [97]. При переходе пользовательского оборудования, находящегося на расстоянии менее чем d_{LoS}^E от базовой станции, в состояние блокировки для поддержания сессии основная базовая станция может выделить большее количество ресурсов для компенсации падения качества радио канала. Однако это возможно только лишь при условии небольшого расстояния UE от BS, определяемого радиусом $r = d_{LoS}^E$. Этот радиус задает область зоны покрытия в виде круга, называемого далее «внутренней зоной». «Внешняя зона» при этом имеет форму кольца с радиусом R , который можно по аналогии определить как расстояние от базовой станции до границы зоны обслуживания, удаленной на расстояние d_{nLoS}^E . Поскольку сессии из внутренней зоны не подвержены сбросу в результате блокировки, то установление множественных соединений имеет смысл только в контексте внешней зоны, т.е. сессия из внешней зоны не может обслуживаться на основной BS без прямой видимости, но при этом сессию можно переключить на обслуживание соседней BS, с которой UE находится в условиях

прямой видимости. Очевидно, что радиус внешней зоны ограничен соотношением $r \leq R \leq d_{nLoS}^E$ и определяет расстояние между соседними базовыми станциями (англ. Inter-Site Distance, ISD), обеспечивающее покрытие обслуживаемой территории, таким образом, $d_{ISD} = R + r$. Если расстояние между пользовательским оборудованием и базовой станцией становится больше, чем R , пользователь покидает зону покрытия текущей BS, и в этом случае происходит сброс сессии так как нет возможности продолжать её обслуживание.

На рис. 3.2 представлена схема выделения целевой базовой станцией ресурса W , который состоит из C ресурсных блоков и может использоваться как одноадресными, так и многоадресными сессиями. Во внешней зоне, в условиях блокировки прямой видимости для UE, сессия передается на обслуживания соседней BS. При этом из-за увеличения расстояния соседней BS для поддержания соединения потребуется большее или равное количество ресурсов, чем было выделено на основной BS. Поскольку соединения всегда устанавливаются с базовыми станциями, обеспечивающими лучшее качество канала, при восстановлении условий прямой видимости между UE и исходной BS, обслуживание сессии передается обратно к исходной BS с прежним требованием к ресурсу. Но момент возврата сессии на обслуживания может оказаться так, что у исходной базовой станции уже недостаточно свободных ресурсов для дальнейшего обслуживания этой сессии, и в этом случае продолжается обслуживание сессии на соседней BS до тех пор, пока не освободится требуемое количество ресурсов на исходной BS в условиях прямой видимости. Аналогично, изначально установленные соединения с соседней BS, для которых она является исходной, при наступлении блокировки прямой видимости могут перейти на обслуживание целевой BS с большим требованием к ресурсу, чем у соединений, для которых исходной является целевая BS. Запрос на установление одноадресной сессии получает отказ (сброс сессии), если количество доступного ресурса недостаточно для поддержания новой сессии.

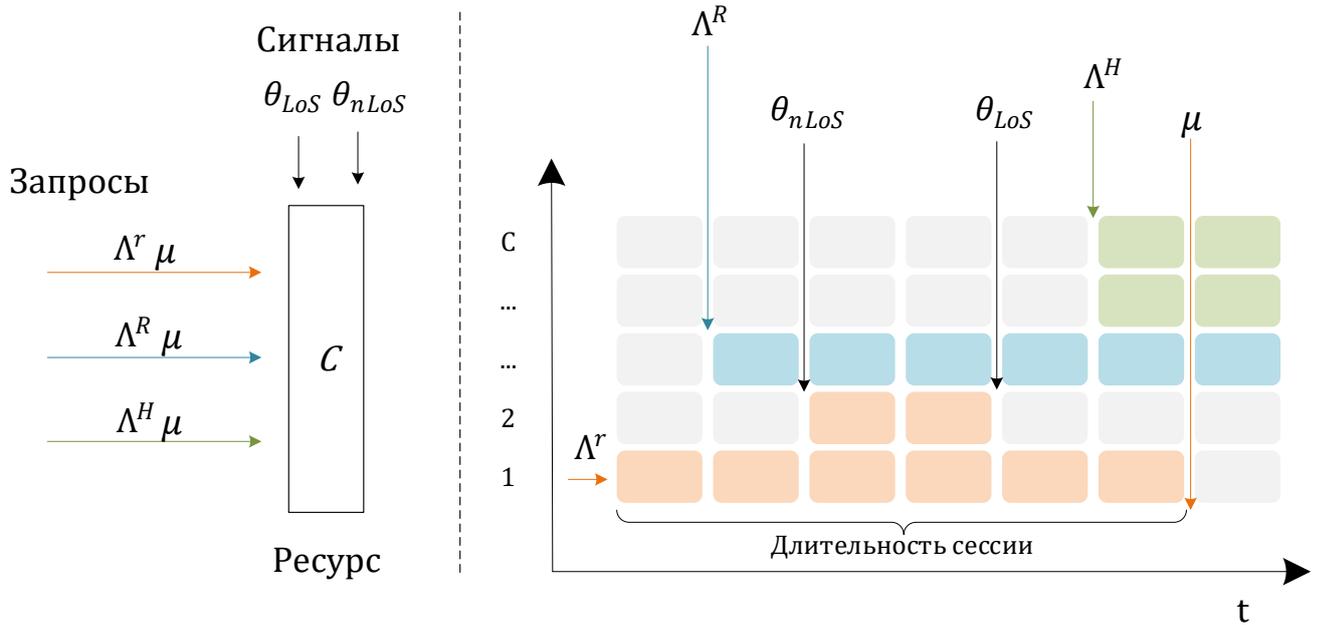


Рис. 3.2. Схема СМО и распределения ресурса.

Одним из наиболее интересных показателей эффективности является вероятность прерывания обслуживания сессии, возникающая в ситуации, когда при блокировке прямой видимости требуемый дополнительный ресурс недоступен. Применительно к многоадресным соединениям под сессией будем понимать обслуживание всех пользователей, запрашивающих одну и ту же услугу и обслуживаемых на одном и том же ресурсе, выделенном в момент приема в систему первого запроса на предоставление этой услуги, поступившего при отсутствии подобных запросов в системе [22]. Отказ на запрос в установлении многоадресной сессии во внутренней зоне происходит, только если в момент поступления запроса нет многоадресных сессий с таким же или большим требованием, и количество доступного ресурса недостаточно для инициализации новой сессии. Когда на линии прямой видимости появляется блокиратор, сессия UE, находящегося во внешней зоне, передаётся на соседнюю базовую станцию, ресурс которой предполагается бесконечным. Это предположение выражается в том, что хэндовер заблокированной сессии всегда возможен. Как только восстанавливаются условия прямой видимости, сессия продолжает обслуживание соседней базовой станции до тех пор, пока на исходной базовой станции не появится доступный ресурс,

достаточный для поддержания сессии, после чего сессия мгновенно передается обратно на исходную базовую станцию.

Для описанных случаев отказа в обслуживании в работе используется термин «сброс» или «потеря», в то время как термин «блокировка» относится к случаям появления блокиратора на линии прямой видимости. В следующем разделе описано построение ресурсной системы массового обслуживания (СМО) [124] с тремя входящими потоками заявок, дискретным ресурсом конечного объема и заявками со случайными дискретными требованиями к ресурсу. Для краткости далее вместо «запрос на установление сессии» будет использоваться термин «запрос».

Для описания процесса обслуживания запросов пользователей отдельно стоящей базовой станцией (целевой BS на

рис. 3.1) рассмотрим ресурсную СМО с неограниченным числом приборов и дискретным ресурсом конечного объема C единиц ресурса [22, 50, 74, 89, 93, 99, 104, 124]. На систему поступают три потока заявок, соответствующие потокам запросов пользователей на установление одноадресных и многоадресных сессий во внутренней (круг) и внешней (кольцо) зонах покрытия целевой BS, а также на обслуживание сессий, заблокированных в соседней BS.

Предположим, все потоки – пуассоновские с параметрами $\Lambda^r = \lambda^{r,U} + \lambda^{r,M}$, $\Lambda^R = \lambda^{R,U} + \lambda^{R,M}$ и $\Lambda^H = \lambda^{H,U} + \lambda^{H,M}$ соответственно, где U и M указывают на тип сессии, а r , R и H – на зону обслуживания (внутренняя зона, внешняя зона, зона обслуживания соседней BS), которая определяется местоположением устройства и состоянием радиоканала до базовых станций. Длительности обслуживания заявок, для которых целевая BS является основной, подчиняются экспоненциальному закону с параметрами μ^U и μ^M , соответственно типу заявки, и не зависят от местоположения соответствующего устройства. Длительность пребывания в системе заявок, заблокированных на соседней BS и временно обслуживаемых целевой BS, также имеет экспоненциальное распределение с

параметром θ_{nLoS} .

Поступившая в систему одноадресная заявка принимается на обслуживание, если в момент ее поступления в системе достаточно свободного ресурса, занимает один прибор и ресурс заданного объема, а по окончании обслуживания освобождает прибор и ресурс. Поступившие в систему многоадресные заявки обслуживаются в соответствии с принципом мультивещания. Многоадресная заявка, поступившая в систему, в которой нет многоадресных заявок, принимается на обслуживание, если в момент ее поступления в системе достаточно свободного ресурса, занимает ресурс заданного объема на все время обслуживания, а по окончании обслуживания освобождает занимаемый ресурс. Первая заявка, инициирующая сессию мультивещания, определяет длительность всей сессии мультивещания: все заявки, поступающие в систему на периоде обслуживания первой заявки, обслуживаются вместе с ней на выделенном для её обслуживания ресурсе, и покидают систему вместе с ней, тем самым завершая сессию [88]. При этом прием в систему многоадресных заявок на периоде обслуживания первой открывшей сессию многоадресной заявки, может оставить без изменения либо увеличить объем занятого обслуживанием многоадресной сессии ресурса, но не может уменьшить его [88].

Движение блокаторов (рис. 3.3) моделируется с помощью двух экспоненциально распределенных с параметрами θ_{LoS} и θ_{nLoS} случайных величин – длительности интервала между соседними появлениями блокиратора прямой видимости (т.е. длительности нахождения UE в состоянии LoS) и длительности интервала блокировки прямой видимости (т.е. длительности нахождения UE в состоянии nLoS).

Переданная на обслуживание в соседнюю BS заявка обслуживается в течение экспоненциально распределенного с параметром θ_{nLoS} интервала, а при отсутствии ресурса на основной BS и далее - либо до освобождения ресурса на основной BS, либо момента завершения обслуживания.

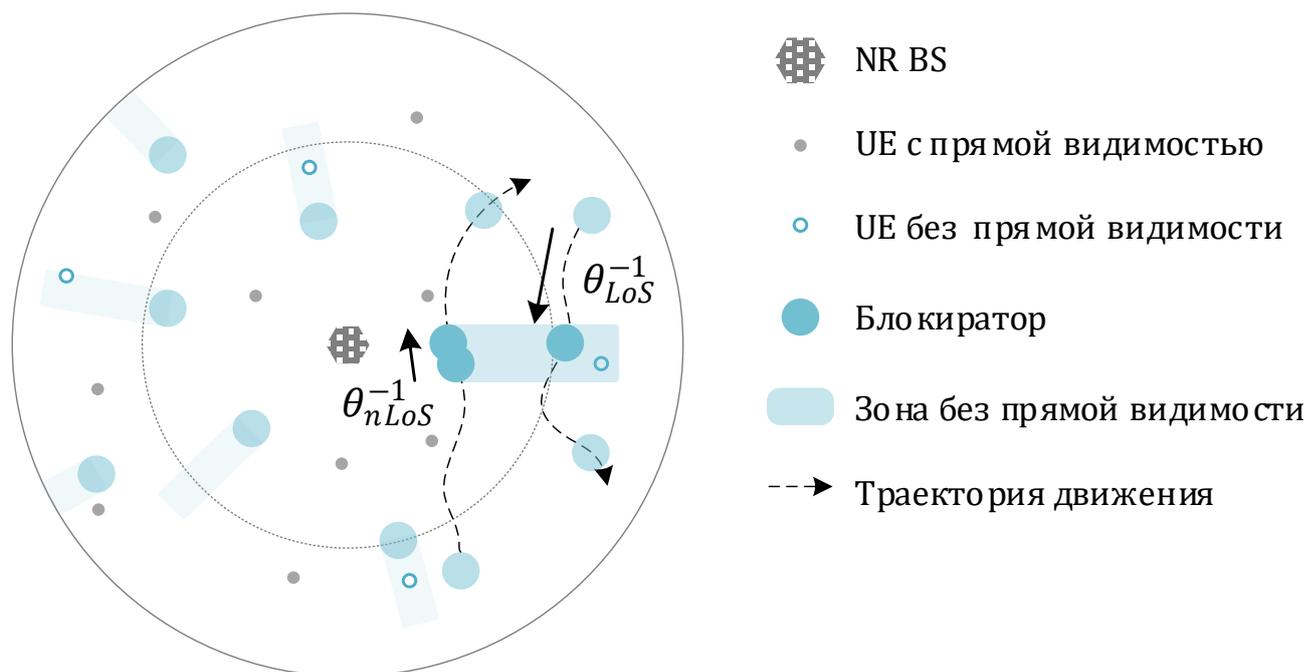


Рис. 3.3. Модель движения блокираторов.

Приведем упрощающие предположения:

1. начало обслуживания заявок всегда происходит в условиях прямой видимости;
2. заявки не могут находиться одновременно в состоянии блокировки прямой видимости до основной и соседней БС.

3.2. Построение модели обслуживания одноадресных соединений и итерационный метод расчета вероятностных характеристик

Рассмотрим ресурсную СМО с N приборами и пуассоновским поступающим потоком интенсивности λ . Предположим, что длительности обслуживания заявок не зависят от поступающего потока, независимы в совокупности, и имеют функции распределения фазового типа $B(x) = 1 - \mathbf{a} \exp(x\mathbf{M})\mathbf{u}$. Здесь \mathbf{a} – вектор-строка длины n распределения вероятностей начальной фазы, \mathbf{u} – вектор-столбец длины n из единиц, и $\mathbf{M} = [\mu_{ij}]$ – невырожденная квадратная матрица порядка n интенсивностей переходов между фазами обслуживания.

Требования заявок к ресурсам могут меняться в течение времени обслуживания и зависят от номера фазы обслуживания. На j -й фазе обслуживания

заявке требуется r_j единиц ресурса. Если при поступлении или в момент смены фазы обслуживания выяснится, что объём требуемого заявке ресурса превышает объём незанятого ресурса, то заявка теряется. Обозначим R общий объём ресурса.

Состояние системы в момент t можно описать однородным марковским процессом $\mathbf{X}(t) = (X_1(t), \dots, X_n(t))$, где $X_j(t)$ – число заявок, обслуживаемых на фазе j . Процесс $X(t)$ имеет конечное пространство состояний

$$\mathcal{X}(R) = \{(k_1, \dots, k_n) \mid k_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \sum_{j=1}^n k_j \leq N, \sum_{j=1}^n k_j r_j \leq R\}. \quad (3.2)$$

Обозначим $\mu_{i0} = -\sum_{j=1}^n \mu_{ij}$ – интенсивность завершения обслуживания заявки после фазы.

Утверждение 3.1: Система уравнений равновесия для процесса $X(t)$ имеет вид (3.3):

$$\begin{aligned} (\lambda I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_i \leq R) a_i + (\mathbf{k}, \boldsymbol{\mu})) p(\mathbf{k}) &= \lambda \sum_{i=1}^n I(k_i > 0) p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_i) a_i + \\ &+ I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{i0} + \\ &+ I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_j > R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{ij} + \quad (3.3) \\ &+ I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{i0} + \\ &+ I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_j > R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{ij}, \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R), \end{aligned}$$

где $I(S)$ – индикатор утверждения S , $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$ и $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_n)$ – векторы-столбцы, \mathbf{e}_i – вектор-строка, все компоненты которого равны 0 кроме стоящей на i -м месте единицы.

Эту систему уравнений можно решить методом последовательных

приближений. В качестве начального приближения возьмём равномерное распределение

$$p(\mathbf{k}) = \frac{1}{|\mathcal{X}(N, R)|}, \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R).$$

Затем, до тех пор, пока не достигнута требуемая точность, вычисляются очередные приближения, при этом каждая итерация состоит из трёх шагов

1. $C := 0$.

$$p(\mathbf{k}) := \frac{1}{(\lambda I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_i \leq R) a_i + (\mathbf{k}, \boldsymbol{\mu}))} \times$$

$$\times \left[\lambda \sum_{i=1}^n I(k_i > 0) p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_i) a_i + I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{i0} + \right.$$

2.

$$+ I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_j > R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{ij} +$$

$$\left. + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I(k_j > 0) I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_j \leq R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) (k_i + 1) \mu_{ij} \right],$$

$$C := C + p(\mathbf{k}), \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R).$$

3. $p(\mathbf{k}) := \frac{1}{C} p(\mathbf{k}), \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R)$.

Одной из ключевых характеристик качества обслуживания является вероятность сброса сессий, которая для рассматриваемой модели вычисляется как $B = (\mathbf{a}, \mathbf{b})$, где $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n)$, а вероятность блокировки в i -й фазе вычисляется по формуле (2).

$$b_i = \sum_{\substack{\mathbf{k} \in \mathcal{X}(R) \\ (\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_i > R}} p(\mathbf{k}) + \sum_{\substack{j \in \{1, \dots, n\} \setminus i \\ (\mathbf{k}, \mathbf{r}) - r_j + r_i > R}} p(\mathbf{k}), 1 \leq i \leq n. \quad (3.4)$$

Помимо вероятности блокировки также исследуется средняя доля используемого ресурса базовой станции NR $UTIL = \sum_{\mathbf{k} \in \mathcal{X}(R)} (\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot p(\mathbf{k})$ при фиксированном и переменном расстоянии до соседних станций (ISD).

Основные параметры, используемые при вычислениях, представлены в таблице 3.2. Для рассматриваемой системы матрица переходов $\mathbf{M} = [\mu_{ij}]$ между фазами обслуживания будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -(\theta_{nLoS}^O + \mu) & 0 & 0 \\ 0 & -(\theta_{nLoS}^I + \mu) & \theta_{nLoS}^I \\ 0 & \theta_{LoS}^I & -(\theta_{LoS}^I + \mu) \end{bmatrix},$$

где первая фаза соответствует незаблокированным сессиям из кольца, вторая фаза - незаблокированным сессиям из круга, а третья фаза - заблокированным сессиям из круга. В этом случае функция распределения

$$B(x) = 1 - \mathbf{a} \exp(x\mathbf{M})\mathbf{u} = 1 - a_1 e^{-x(\mu + \theta_{nLoS}^O)} - (1 - a_1) e^{-\mu x}$$

будет представлять собой гиперэкспоненциальное распределение.

На рис. 3.4 изображен график зависимости вероятности потери сессии в зависимости от положения устройства.

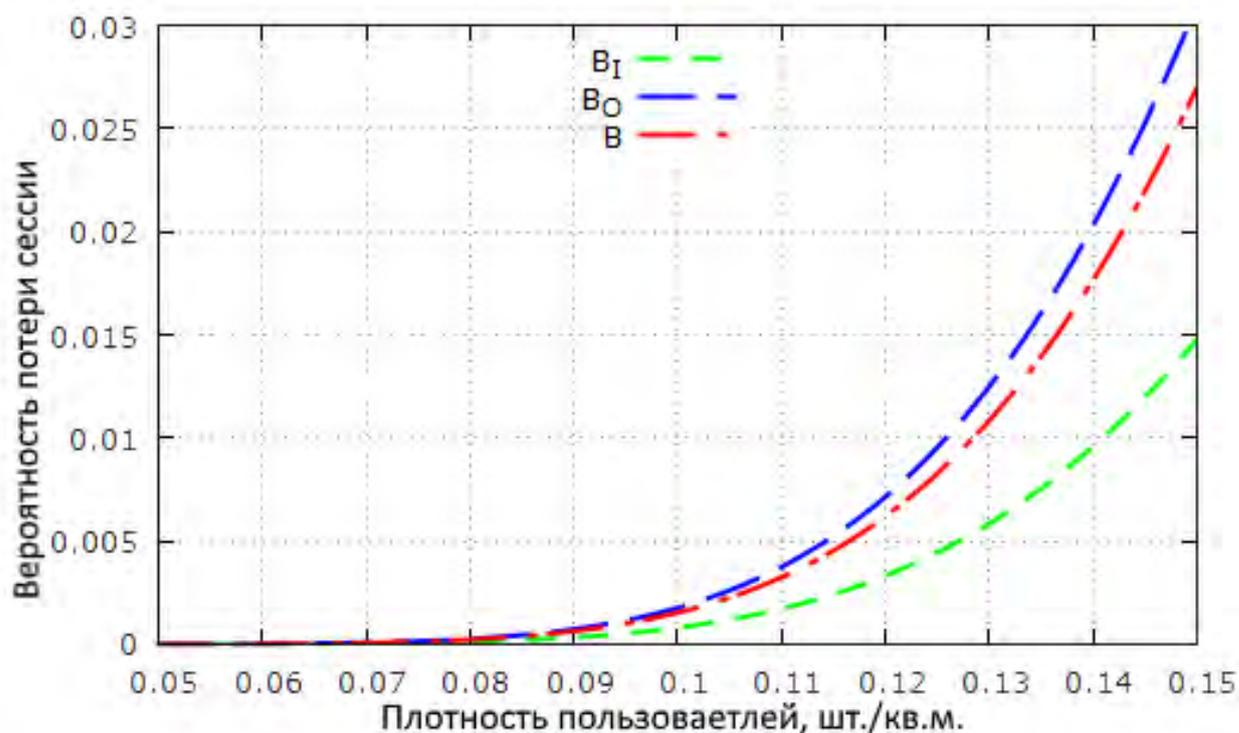


Рис. 3.4. Вероятность потерь сессий в зависимости от положения устройства.

Вероятность блокировки сессий из внешней зоны значительно выше, чем у сессий

из внутренней зоны, так как их общее число и требования выше. Это свидетельствует о необходимости использования принципа множественных соединений, который позволил бы снизить вероятность потери засчет выделения дополнительного ресурса заблокированным сессиям, являющимся наиболее ресурсоемкими. Вследствие высоких требований они в большей степени подвержены отказам в обслуживании.

На рис. 3.5 изображена зависимость средней доли загрузки NR BS от типа и положения устройств. Следует отметить, что на сессии из внешней зоны приходится более 80% от общего используемого ресурса, что лишний раз подтверждает необходимость распределения нагрузки в соответствующей зоне обслуживания между соседними базовыми станциями.

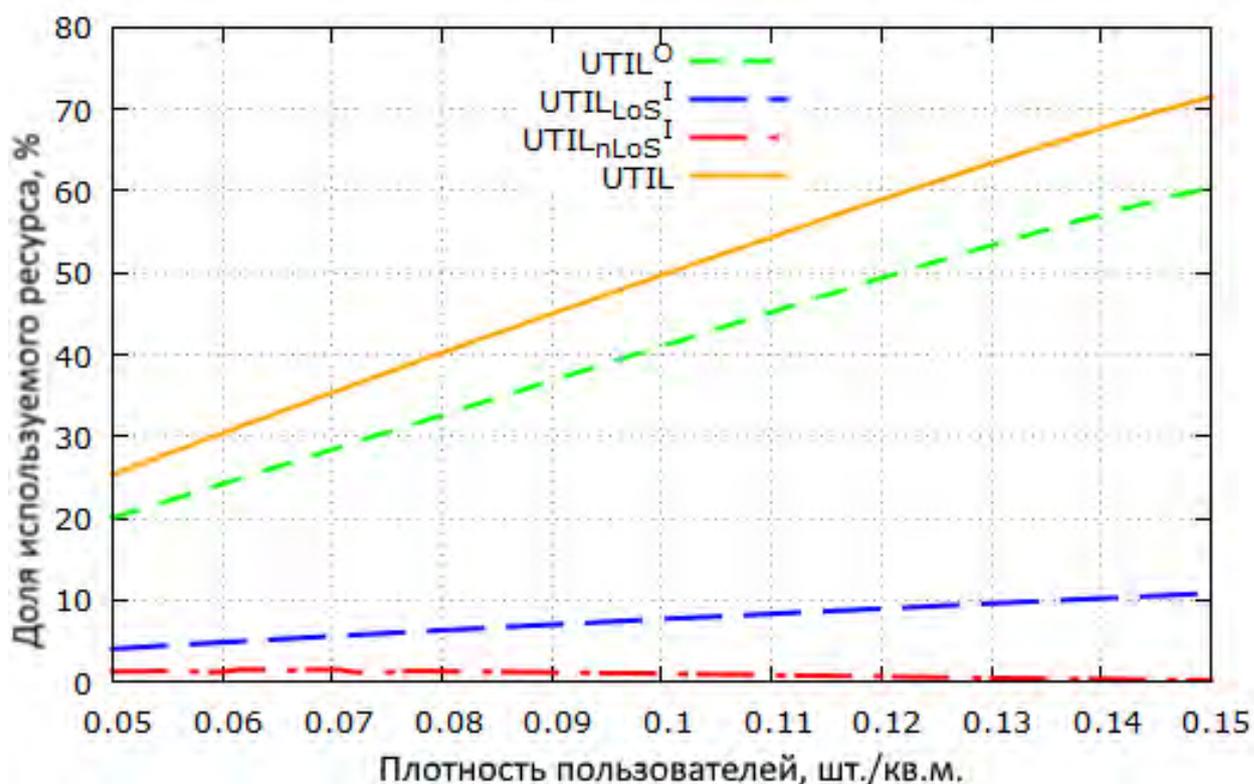


Рис. 3.5. Доля используемого ресурса в зависимости от положения устройства.

В то же время видно, что с ростом плотности устройств доля ресурса, занимаемая незаблокированными устройствами, снижается, что объясняется снижением их общей доли в структуре трафика. Снижение происходит по причине увеличения вероятности блокировки прямой видимости вследствие

увеличения числа потенциальных блокираторов.

3.3. Имитационная модель и численный анализ

Для анализа системы, схематично изображённой на рис. 3.6, был разработан программный комплекс на основе принципов дискретно-событийного имитационного моделирования. Такой подход позволяет добиться высокой степени гибкости модели, а также исследовать различные сценарии и модели движения пользователей.

В рассматриваемой системе поступление запросов на установление соединения s -услуги характеризуется тремя пуассоновскими потоками:

- запросы на установление соединения из внутренней зоны с интенсивностью $\lambda^{r,s}$;
- запросы на установление соединения из внешней зоны с интенсивностью $\lambda^{R,s}$;
- запросы на хэндовер соединения из соседней соты в целевую с интенсивностью $\lambda^{H,s}$.

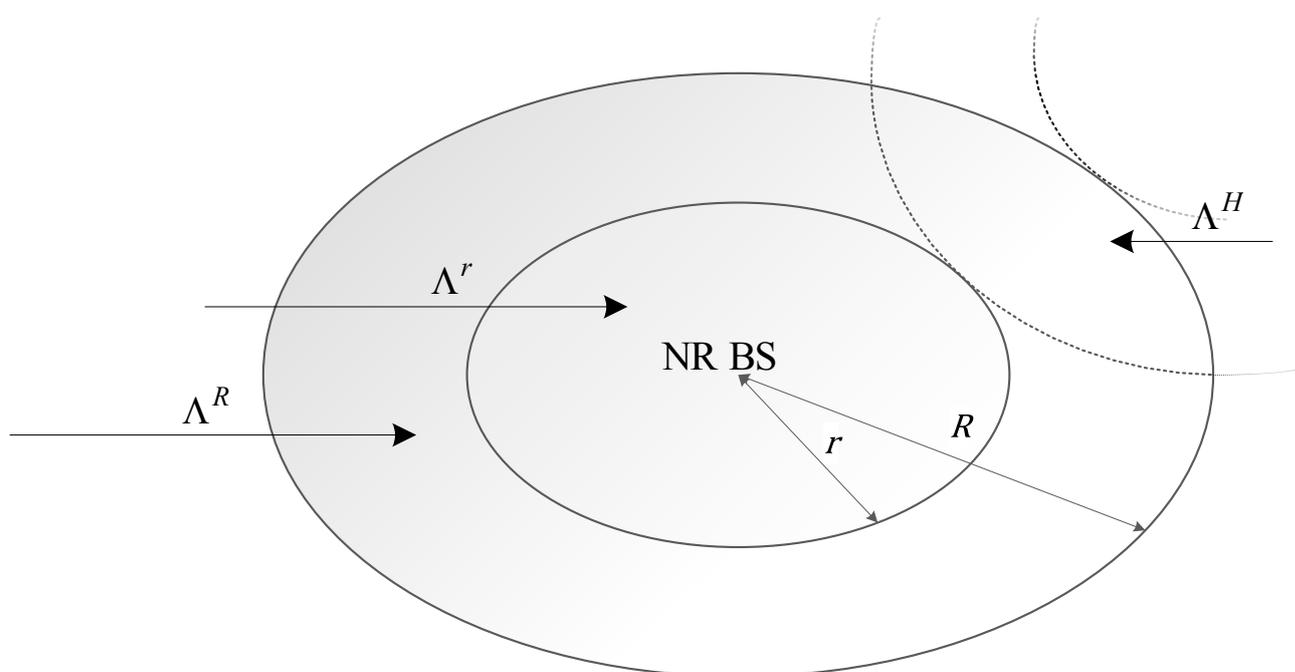


Рис. 3.6. Схема отдельно стоящей соты сети 5G NR.

Алгоритм работы имитационной модели представлен в виде псевдокода в

таблице 2.1, в котором для удобства используется следующая функция-индикатор:

$$u^M(\tau, b^t) = \begin{cases} 0, & t = M \text{ и нет многоадресных сессий с требованием } b \geq b^t, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Таблица 3.1. Алгоритм имитационного моделирования

Алгоритм 1 Алгоритм имитационного моделирования процесса обслуживания одноадресного и многоадресного трафика в сети 5G NR

Входные параметры: $C, r, R, \mathbf{b}, \rho^U, \rho^M, \lambda^U, \lambda^M, \mu^U, \mu^M, T$

Выходные параметры: $B_U, B_M, UTIL$

Инициализация: $S^U = 0, S^M = 0, B^U = 0, B^M = 0, UTIL = 0, l_\tau = 0$

- 1: Сгенерировать координаты для $N^U \sim Pois(\lambda^U \rho^U \pi R^2)$ и $N^M \sim Pois(\lambda^M \rho^M \pi R^2)$ UE
- 2: **for** $n=1$ to $N^U + N^M$ **do**
- 3: Добавить события о приходе и завершении обслуживания первой сессии
- 4: **end for**
- 5: **for** $\tau=0$ to T **do**
- 6: Обработать текущее событие $E(\tau)$
- 7: **if** $E(\tau)$ = запрос на соединение t -типа **then**
- 8: Добавить событие о приходе и завершении обслуживания следующей сессии t -типа
- 9: **if** $\tilde{C}(\tau) + b_{LoS}^s \cdot u^M(\tau, b_{LoS}^s) \leq C$ **then**
- 10: Принять сессию на обслуживание: $S^s = S^s + 1$
- 11: Выделить ресурс $b_{LoS}^s \cdot u^M(\tau, b_{LoS}^s)$
- 12: **else**
- 13: Отказать в установлении соединения: $B^s = B^s + 1$
- 14: **end if**
- 15: **end if**
- 16: **if** $E(\tau)$ = блокировка LoS сессии s -типа **then**
- 17: **if** $\tilde{C}(\tau) + (b_{nLoS}^s - b_{LoS}^s) \cdot u^M(\tau, b_{nLoS}^s) \leq C$ **then**
- 18: Продолжить обслуживание

```
19: Выделить дополнительный ресурс  $(b_{nLoS}^s - b_{LoS}^s) \cdot u^M(\tau, b_{nLoS}^s)$ 
20: else
21: Сбросить сессию:  $B^s = B^s + 1$ 
22: end if
23: end if
24: if  $E(\tau)$  = разблокировка LoS сессии  $t$ -типа then
25: Продолжить обслуживание
26: Освободить ресурс  $(b_{nLoS}^s - b_{LoS}^s) \cdot u^M(\tau, b_{nLoS}^s)$ 
27: end if
28: if  $E(\tau)$  = завершение обслуживания сессии  $s$ -типа then
29: Освободить ресурс  $b^s \cdot u^M(\tau, b^s)$ 
30: end if
31:  $UTIL = UTIL + \tilde{C}(\tau) \cdot (\tau - l_\tau)$ 
32:  $l_\tau = \tau$ 
33: end for
34:  $B^U = B^U / S^U$ 
35:  $B^M = B^M / S^M$ 
36:  $UTIL = (UTIL/T) \cdot 100$ 
37: return  $B_U, B_M, UTIL$ 
```

Для расчета требуемого количества радиоресурсов используются схемы модуляции и кодирования NR MCS. Запрос на установление одноадресной сессии сбрасывается, если в момент его поступления объема доступных свободных ресурсов недостаточно для его обслуживания. В момент поступления многоадресного запроса он принимается с учетом других активных многоадресных сессий: если в момент поступления запроса в системе обслуживается хотя бы одна многоадресная сессия с большим или равным требованием к ресурсу, для установления новой сессии дополнительные ресурсы не выделяются, так как она может обслуживаться на том же ресурсе. Если же объем ресурса, занимаемый многоадресными сессиями, меньше, чем требование новой многоадресной сессии,

она принимается на обслуживание только при условии наличия доступного дополнительного ресурса.

Поскольку все процессы в рассматриваемой системе по своей природе имеют стационарный режим, а пропускная способность системы ограничена, при определенных значениях параметров система всегда может достичь условий стационарного режима. Достижение стационарного режима определяется с помощью метода экспоненциально-взвешенного скользящего среднего с параметром сглаживания, равным 0,05. При наступлении стационарного режима данные собираются как общее среднее из каждой последовательной группы по тысячу наблюдений, что позволяет избавиться от эффекта остаточной корреляции [65]. Среднее в каждой из групп наблюдений статистически не зависит от других групп, поэтому набор данных из средних чисел может быть исследован с помощью традиционных методов математической статистики.

В данном разделе также приводится численный анализ функционирования NR BS, обслуживающей трафик одноадресных и многоадресных соединений. Вначале рассматриваются вероятности сброса одноадресных и многоадресных сессий, а также средняя доля используемого ресурса NR BS при фиксированном расстоянии ISD между базовыми станциями. Далее проводится анализ вышеперечисленных характеристик при изменении параметра ISD. Основные параметры [30, 93], используемые при вычислениях, представлены в таблице 3.2.

Рассмотрим поведение системы на примере характеристик, ориентированных на пользователя и на систему в целом при фиксированном расстоянии ISD. На рис. 3.7 представлены вероятности сброса одноадресных и многоадресных сессий в каждой из двух зон, определенных в физической модели, в зависимости от доли предложенной нагрузки одноадресных запросов $\frac{\rho^U}{\rho^U + \rho^M}$

при фиксированном значении $ISD = 600$ м и общей предложенной нагрузке $\rho^U + \rho^M = 1$ Эрл.

Таблица 3.2. Входные параметры и исходные данные

Обозначение	Описание	Значения
f_c	рабочая частота	28 ГГц
W	выделенная полоса частот	1 ГГц
s_A	ширина ресурсного блока (RB)	1,44 МГц
r_B	радиус препятствия	0,4 м
P_T	мощность передающей антенны NR BS	0.2 Вт
G_T	усиление антенны	2,58 дБ
γ	коэффициент затухания сигнала	2,1
v	поддерживаемая скорость сессии	50 Мбит/с
R	радиус внешней зоны	400-800 м
C	количество ресурсных блоков в выделенной полосе частот	667
d_{ISD}	расстояние между соседними BS	600-1200 м
$b_{LoS}^{r,U}, b_{LoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внутренней зоне при наличии прямой видимости	16 ед. ресурса
$b_{nLoS}^{r,U}, b_{nLoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внутренней зоне без прямой видимости	158 ед. ресурса
$b_{LoS}^{R,U}, b_{LoS}^{R,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внешней зоне при наличии прямой видимости	31 ед. ресурса
$b_{LoS}^{H,U}, b_{LoS}^{H,M}$	требования одноадресных и многоадресных хэндовер-сессий	50 ед. ресурса
ρ^U, ρ^M	плотность устройств, использующих одноадресные и многоадресные соединения	0,001 UE/м ²
λ^U, λ^M	интенсивность поступления одноадресных и многоадресных запросов от одного устройства	10^{-3} с^{-1}
μ^U, μ^M	интенсивность обслуживания одноадресных и многоадресных сессий	$1/30 \text{ с}^{-1}$
θ_{LoS}	параметр распределения периодов между последовательными блокировками прямой видимости	$0,34 \text{ с}^{-1}$

Как видно из рисунка, вероятность сброса многоадресных сессий экспоненциально растет с ростом доли одноадресной нагрузки. Однако вероятность сброса одноадресных сессий возрастает относительно медленно, при этом рост даже замедляется по мере достижения полной загрузки. Это объясняется

тем, что трафик многоадресных сессий обслуживается с неявным резервированием ресурсов, и по этой причине имеет некоторый приоритет в обслуживании. В частности, даже при высоких значениях доли нагрузки одноадресных сессий вероятность того, что вновь поступившая многоадресная сессия сможет обслуживаться на ресурсе, уже занятом ранее другой активной многоадресной сессией, остается отличной от нуля. Так же можно отметить, что этот эффект наблюдается в обеих зонах обслуживания - как во внутренней, так и во внешней.

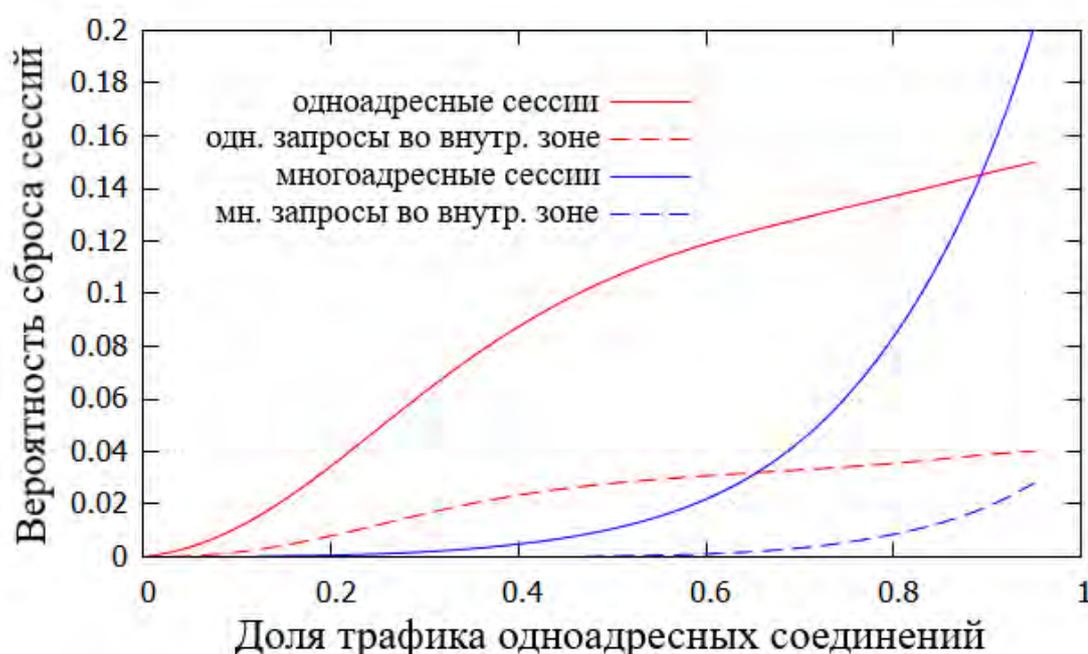


Рис. 3.7. Вероятность сброса сессий при фиксированном значении ISD.

На рис. 3.8 изображена зависимость средней доли загрузки NR BS различными типами трафика от доли одноадресной нагрузки при фиксированном значении $ISD = 600$ м и общей предложенной нагрузке $\rho^U + \rho^M = 1$ Эрл. Нетрудно заметить, что доля загрузки системы растет с ростом доли одноадресных соединений. Причина в том, что с уменьшением доли одноадресной нагрузки в большей степени проявляет себя эффект переиспользования ресурсов многоадресными сессиями.

Теперь рассмотрим характеристики системы при различных значениях ISD. На рис. 3.9 изображены вероятности сброса одноадресных сессий для различных значений ISD в зависимости от доли нагрузки одноадресных соединений. Здесь

можно заметить более резкий рост вероятности сброса при увеличении ISD с 600 до 800 метров, чем при увеличении с 800 до 1000 метров.

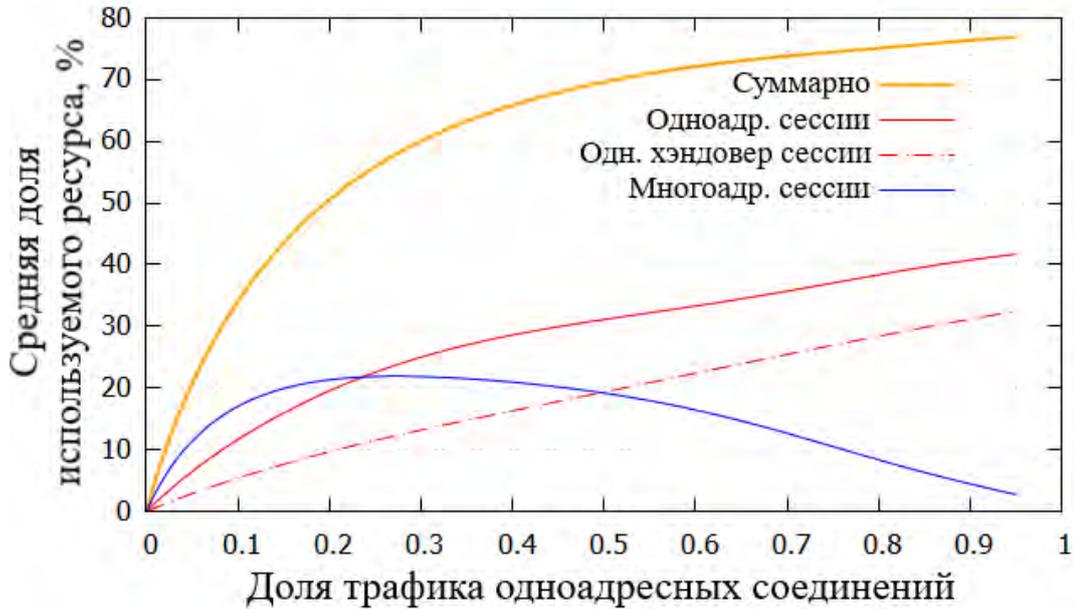


Рис. 3.8. Средняя загрузка NR BS при фиксированном значении ISD.

На рис. 3.10 аналогичным образом отражены вероятности сброса для многоадресных сессий. При сравнении вероятностей сброса одноадресных и многоадресных сессий на рис. 3.9 и рис. 3.10, можно отметить, что значения у последних ниже.

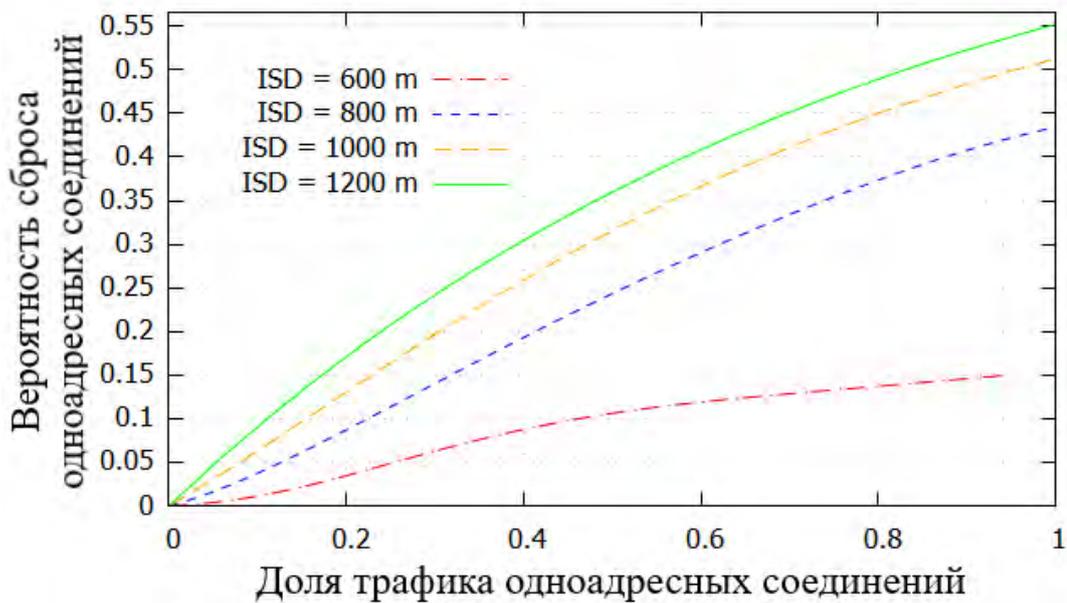


Рис. 3.9. Вероятность сброса одноадресных сессий при различных значениях ISD.

Также довольно интересным наблюдением является тот факт, что вероятность сброса многоадресных сессий понижается с увеличением ISD, что нетипично для одноадресных сессий. Это вызвано тем, что увеличение расстояния между NR BS приводит к бóльшим требованиям к ресурсам сети в расчете на пользователя, в то время как многоадресные сессии быстрее занимают достаточный объем ресурсов, за счёт чего снижается вероятность их сброса. Более того, данный эффект усиливается благодаря приходу хэндовер-сессий от соседних NR BS.

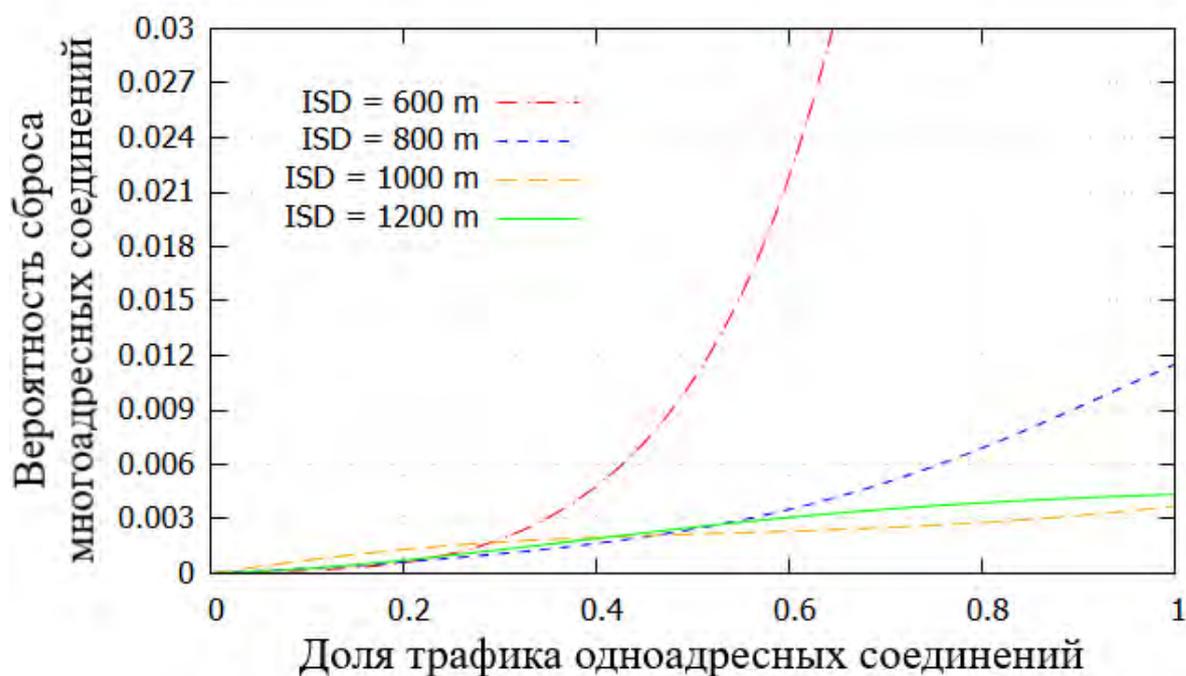


Рис. 3.10. Вероятность сброса многоадресных сессий при различных значениях ISD.

Так как современные сети обслуживают преимущественно гетерогенный трафик, также был рассмотрен случай с несколькими типами услуг. Структура исследуемого трафика подобрана в соответствии с прогнозами ведущих аналитических компаний на 2024 год [35, 42] и разделена на основные типы услуг:

- передача потокового видео;
- передача потокового аудио;
- обмен файлами;
- просмотр веб-страниц;

- социальные сети;
- услуги межмашинного взаимодействия (M2M).

На рис. 3.11 и рис. 3.12 представлены результаты имитационного моделирования процесса обслуживания гетерогенного трафика, в котором услуга передачи потокового видео распределена между одноадресной и многоадресными способами передачи данных в соответствии с долей, отложенной по оси OX .

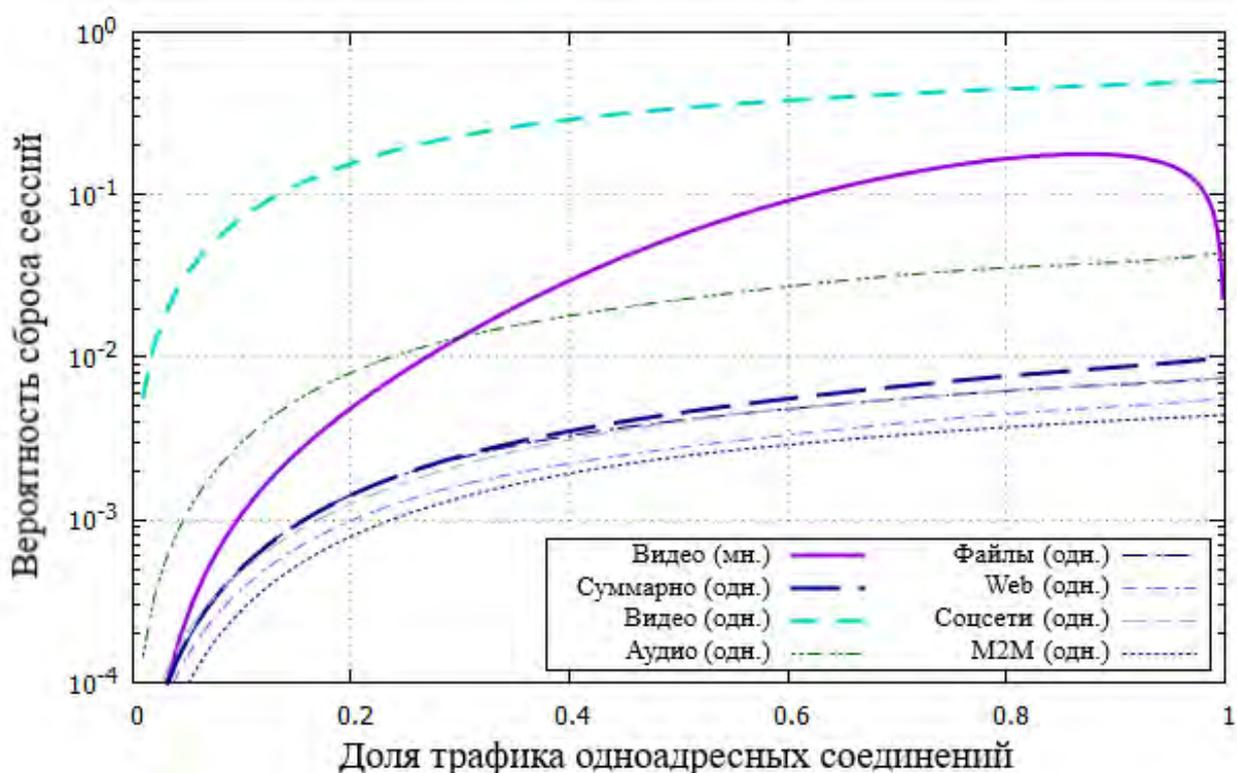


Рис. 3.11. Вероятность сброса сессий при обслуживании гетерогенного трафика.

Выбор данной услуги обусловлен как наибольшим объёмом в общей структуре трафика, так и возможностью применения технологии мультивещания, основным критерием которой является заинтересованность пользователей в одних и тех же данных.

Стоит отметить, что при высокой загрузке системы (более 75%) вероятность сброса многоадресных соединений остается относительно небольшой (не более 0,2), чего нельзя сказать об обслуживании одноадресных соединений для аналогичной услуги. Это еще раз свидетельствует о более высокой надежности и спектральной эффективности многоадресной передачи.

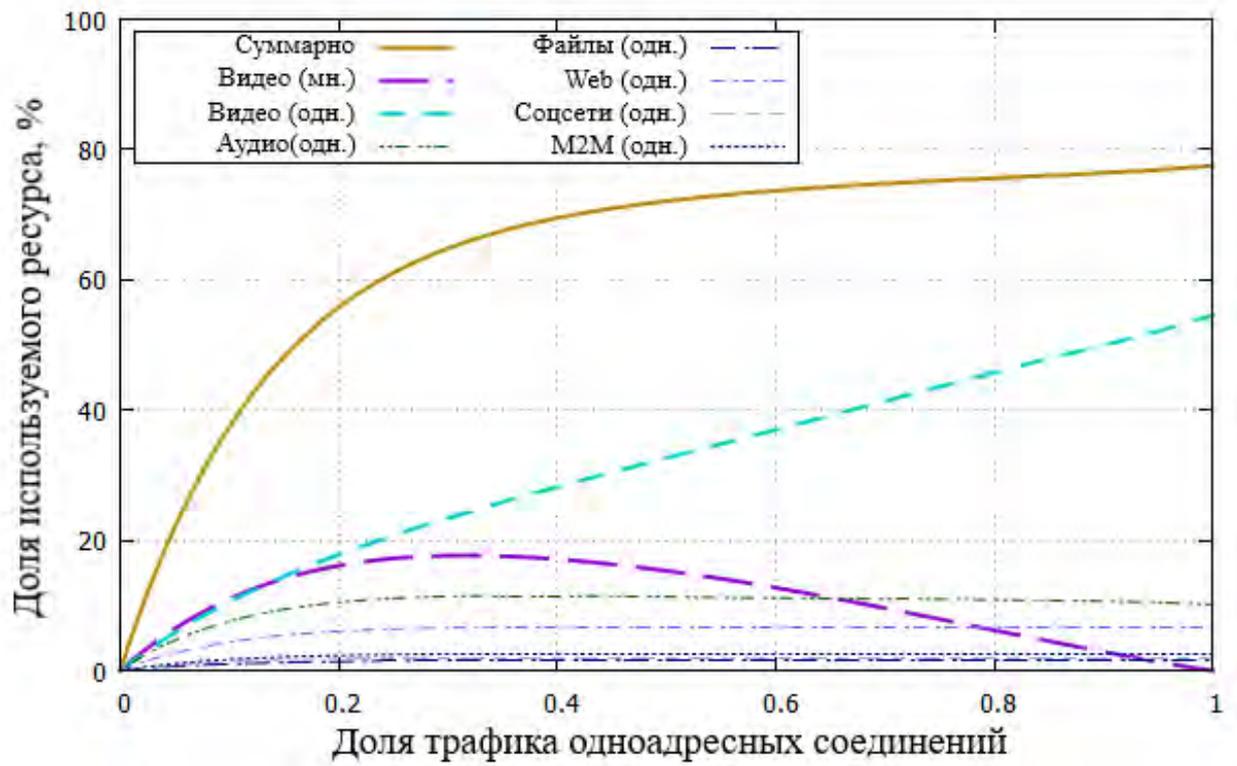


Рис. 3.12. Средняя загрузка NR BS при обслуживании гетерогенного трафика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертационной работы сформулируем основные результаты и выводы по сравнению с результатами других исследований.

1. Разработана модель расположения пользователей беспроводной сети с многоадресной передачей данных для поиска оптимальной конфигурации многоадресных групп в виде замкнутой СМО, позволяющая учитывать различные стратегии распределения ресурсов.
2. Разработан метод расчета показателей эффективности модели базовой станции высокочастотной сети с переключением пользователей на соседние станции в виде СМО ограниченной емкости с переменными требованиями к ресурсам. Метод позволяет дать рекомендации по плотности размещения базовых станций высокочастотной сети.
3. Разработана имитационная модель для оценки показателей эффективности базовой станции высокочастотной сети. Численный эксперимент показал достоверность аналитической модели с одноадресными соединениями. Для модели с одноадресными и многоадресными соединениями показано, что мультивещание позволяет повысить надежность передачи данных за счет снижения качества одноадресных соединений.

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой ПИиТВ, д.т.н., профессору Самуйлову К.Е., к.ф.-м.н, профессору Наумову В.А., доценту кафедры ПИиТВ Абаеву П.О, к.ф.-м.н, доценту кафедры ПИиТВ Кочетковой И.А. и к.ф.-м.н, старшему преподавателю кафедры ПИиТВ Остриковой Д.Ю. за поддержку в ходе проведения научных исследований в рамках диссертации, за конструктивные советы в научных поисках. Искренне благодарю исследовательскую группу Технологического университета г. Тампере за плодотворное сотрудничество, а именно к.т.н., доцента кафедры ПИиТВ Молчанова Д.А.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

5G NR	-	Fifth Generation New Radio
D2D	-	Device-to-Device, прямые взаимодействия оконечных устройств
BS	-	Base Station
M2M	-	Machine-to-Machine, межмашинное взаимодействие
nLoS	-	non Line-of-Sight
LoS	-	Line-of-Sight
LTE	-	Long-Term Evolution
SINR	-	Signal to Interference plus Noise Ratio, отношение сигнала к интерференции плюс шум
SIR	-	Signal to Interference Ratio, отношение сигнал к интерференции
QoS	-	Quality of Service
UE	-	User equipment
QoE	-	Quality of Experience
СМО	-	система массового обслуживания
СеМО	-	сеть массового обслуживания
ТМО	-	теория массового обслуживания
mmWave	-	Millimeter Wave
eMBMS	-	enhanced Multimedia Broadcast Multicast Services
MTC	-	Machine Type Communications
МНС	-	Matern Hardcore Process
PPP	-	Poisson Point Process
UE	-	User Equipment
CQI	-	Channel Quality Index

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Глава 1

l_0	– расстояние между рассматриваемой парой целевой источник–приемник
l_i	– расстояние между парами целевой источник-интерферирующий i -источник
N	– число устройств в соте
r	– параметр МНС-процесса
n	– число заявок в буфере
L	– емкость сервера
μ^{-1}	– среднее время обслуживания заявки
θ^{-1}	– среднее время прогулки прибора
H	– пороговое значение выхода сервера с прогулки
π	– вероятность блокировки пакета
$UTIL$	– средняя доля времени работы сервера
Q	– среднее число заявок в очереди
W	– среднее время ожидания в очереди
s	– размер поступающего пакета
l_τ	– время актуальности пакета
c	– число приборов
γ_k	– вероятность того, что в одном слоте будет сгенерировано ровно k пакетов

B	– вероятность потери пакета
-----	-----------------------------

Глава 2

$M = \{1, \dots, M\}$	– множество абонентов сети
N	– количество ресурсных блоков
$S = \{1, \dots, S\}$	– множество доступных уровней CQI
m_s	– число UE с качеством канала, соответствующим s -CQI

b_s	– объем данных, передаваемых с помощью одного ресурсного блока, с использованием схемы модуляции и кодирования, соответствующей s -CQI
$L = \{1, \dots, L\}$	– множество подгрупп мультивещания в текущий момент
n_l	– количество ресурсных блоков, выделенных l -подгруппе
R	– радиус соты
β_s	– вероятность события, когда пользователь отдаляется от базовой станции и меняет индекс CQI с s на $s-1$
α_s	– вероятность события, при котором пользователь приближается к базовой станции и меняет CQI с s на $s+1$
P_1	– вероятность оптимальной конфигурации с одной подгруппой мультивещания
P_2	– вероятность оптимальной конфигурации с двумя подгруппами мультивещания
<i>Глава 3</i>	
λ	– параметр экспоненциально распределенных интервалов между двумя последовательными поступлениями запросов от одного пользователя
Λ	– интенсивность поступления запросов
f_c	– рабочая частота
W	– выделенная полоса частот
γ	– коэффициент затухания сигнала
R	– радиус внешней зоны
C	– количество ресурсных блоков в выделенной полосе частот
d_{ISD}	– расстояние между соседними BS
b_{LoS}	– требование при наличии прямой видимости
b_{nLoS}	– требования без прямой видимости

ρ^U, ρ^M	– плотность устройств, использующих одноадресные и многоадресные соединения
λ^U, λ^M	– интенсивность поступления одноадресных и многоадресных запросов от одного устройства
μ^U, μ^M	– интенсивность обслуживания одноадресных и многоадресных сессий
θ_{LoS}	– параметр распределения периодов между последовательными блокировками прямой видимости
$\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$	– вектор требований заявок
B	– вероятность потери сессии
$UTIL$	– средняя доля используемого ресурса NR BS

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3GPP TR 25.814: Physical layer aspect for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), Rel. 7. – 2006.
2. 3GPP TR 25.942 v9.0.0: Group Radio Access Networks; Radio Frequency (RF) system scenarios, Rel. 9. – 2009.
3. 3GPP TR 36.785 v14.0.0: Group Radio Access Networks; Vehicle-to-Vehicle (V2V) services based on LTE sidelink, Rel. 14. – 2016.
4. 3GPP TR 38.901: 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, Rel. 14. – 2017. URL: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm> (accessed 24.06.2019).
5. 3GPP TS 23.246: Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description: Release 12. – 3GPP. – 2014.
6. 3GPP TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN), Rel. 13. – 2006.
7. 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 – 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed 31.07.2019).
8. 3GPP TR 38.211: NR: Physical channels and modulation, Rel. 15 – 2017. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/ (accessed 31.07.2019).
9. *Ibrahim A.M., ElBatt T., El-Keyi A.* Coverage Probability Analysis for Wireless Networks Using Repulsive Point Processes // IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: Fundamentals and PHY Track. – 2013. – Pp. 1002-1007.
10. *Akyildiz I., Gutierrez-Estevez D., Reyes E.* The evolution to 4G cellular systems: LTE-advanced // Physical Communication. – 2010. – 3(4). – Pp. 217–244.
11. *Alfa A.S.* Queueing Theory for Telecommunications. Discrete Time Modeling of a Single Node System // Springer Science Business Media, 2010. – 248 p.
12. *Andreev S, Moltchanov D, Galinina O, Pyattaev A, Ometov A, Koucheryavy Y.* Network-assisted device-to-device connectivity: contemporary vision and open

- challenges // In Proceedings of 21th European Wireless Conference, VDE, Budapest. – 2015. – Pp. 1–8.
13. *Andreev S, Pyattaev A, Johnsson K, Galinina O, Koucheryavy Y.* Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections // *IEEE Communications Magazine.* –52(4), 2014. – Pp. 20–31.
14. *Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., Gerasimenko M., Tirronen T., Torsner J., Sachs J., Dohler M., Koucheryavy Y.* Understanding the IoT connectivity landscape: A contemporary M2M radio technology roadmap // *IEEE Communications Magazine.* – 2015. – 53(9). – Pp. 32–40.
15. *Andrews J., Ganti K., Haenggi M., Jinda N. and Weber S.* A primer on spatial modeling and analysis in wireless networks // *IEEE Comm. Sur. Tut.* – 2010. – Vol. 48, no. 11. – Pp. 156–163.
16. *Araniti G., Bisio I., Sanctis M.D., Rinaldi F., Sciarrone A.* Joint Coding and Multicast Subgrouping Over Satellite-eMBMS Networks // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* – 2018. – Vol. 36, no.5. – Pp. 1004-1016.
17. *Araniti G., Condoluci M., Militano L., and Iera A.* Adaptive Resource Allocation to Multicast Services in LTE Systems // *IEEE Transaction on Broadcasting.* – 2013. – Vol. 59, no.4. – Pp. 658–664.
18. *Araniti G., Condoluci M., Cotronei M., Iera A., and Molinaro A.* A Solution to the Multicast Subgroup Formation Problem in LTE Systems. // *IEEE Wireless Communications Letters.* – 2015. – Vol. 4, no. 2. – Pp. 658–664.
19. *Araniti G., Condoluci M., Scopelliti P., Molinaro A., and Iera A.* Multicasting over Emerging 5G Networks: Challenges and Perspectives // *IEEE Network.* – 2017. – Vol. 31, no. 2. – Pp. 80–89.
20. *Araniti G., Campolo C., Condoluci M., Iera A., Molinaro A.* LTE for vehicular networking: a survey // *IEEE Communications Magazine.* – 2013. – Vol. 51, No. 5. – Pp. 148–157.
21. *Baccelli F., Blaszczyszyn B.* Stochastic geometry and wireless networks. – Vol. 1. – Now Publishers Inc, 2009. – 150 p.

22. *Basharin G.P., Gaidamaka Y.V., Samouylov K.E.* Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of next generation networks // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2013. – Vol. 47, no. 2. – Pp. 62–69.
23. *Bazzi A., Masini B.M., Zanella A., Thibault L.* Beaconing from connected vehicles: IEEE 802.11p vs. LTE-V2V // *IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. – 2016. – Pp. 1–6.
24. *Begishev V., Kovalchukov R., Samuylov A., Ometov A., Moltchanov D., Gaidamaka Yu., Andreev S.* An analytical approach to SINR estimation in adjacent rectangular cells // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2015. – 9247. – Pp. 446 – 458.
25. *Beschastnyi V., Polovov M., Ostriкова D., Gudkova I., Araniti G., Shorgin S.* Analytical Model for Performance Analysis of Video Flow Transmission to Multicast Subgroups in 5G Wireless Networks // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2116, no. 090004. <https://doi.org/10.1063/1.5114069>. – Pp. 1–5.
26. *Beschastnyi V., Naumov V., Scopelliti P., Gudkova I., Campolo C., Araniti G., Dzantiev I., Samouylov K.* Discrete Time Bulk Service Queue for Analyzing LTE Packet Scheduling for V2X Communications // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2017. . – Vol. 10531. – Pp. 395–407.
27. *Beschastnyi V., Savich V., Ostriкова D., Gudkova I., Araniti G., Shorgin V.* Analysis of Machine-Type Communication Data Transmission by Multicasting Technology in 5G Wireless Networks // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2116, no. 090005. <https://doi.org/10.1063/1.5114070> – Pp. 1–5.
28. *Beschastnyi V.A., Ostriкова D.Yu., Zeifman A.I., Gudkova I.A.* Optimal Multicast Subgrouping in Mobility-Aware 5G Systems: Challenges, Modeling, and Opportunities // *Proceedings of the Selected Papers of the 12th International*

- Workshop on Applied Problems in Theory of Probabilities and Mathematical Statistics (Summer Session), Lisbon, Portugal. – 2018. – Vol. 2332. – Pp. 13 – 22.
29. *Biason A. and Zorzi. M.* Multicast via Point to Multipoint Transmissions in Directional 5G mmWave Communications // *IEEE Communications Magazine*. – 2019. – Vol. 57, no. 2. – Pp. 88-94.
30. *Borodakiy V.Y., Samouylov K.E., Gudkova I.A., Markova. E.V.* Analyzing Mean Bit Rate of Multicast Video Conference in LTE Network with Adaptive Radio Admission Control Scheme. – 2016. *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 218, no. 3. Pp. 257–268.
31. *Bose, S.K.* An Introduction to Queuing Systems // Springer, Heidelberg. – 2002. – 285 p.
32. *Brockmann D., Hufnagel L., Geisel T.* The scaling laws of human travel // *Nature*. – 2006. – Vol. 439. – Pp. 462–465.
33. *Busson A. and Chelius G.* Point Process for Interference Modeling in CSMA/CA Ad-Hoc Networks // Research Report RR-6624, Inria. – 2008. – Pp. 1–11.
34. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2017–2022 White Paper. – 2019. URL <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html> (accessed July 20, 2019).
35. Cisco, 2017. The Zettabyte Era: Trends and analysis. White Paper. Available at: <http://wikiurls.com/?http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html> (accessed 17.06.2019).
36. *Cox D. and Isham V.* Point processes // Chapman and Hall/CRC Monographs on Statistics and Applied Probability. – 1980. – 186 p.
37. *Crosby G.V., Vafa F.* Wireless sensor networks and LTE-A network convergence // 38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. – 2013. Pp. 731–734.
38. *Dohler M. and Li Y.* Wireless Relay Channel in Cooperative Communications: Hardware, Channel & Physics // John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. – 2010.

- Pp. 464.
39. *Efimushkina T., Gabbouj M., Samuylov K.* Analytical model in discrete time for cross-layer video communication over LTE // *Automatic Control and Computer Sciences.* – 2014. – Vol. 48, no. 6. – Pp. 345–357.
40. *ElSawy H., Hossain E., Haenggi M.* Stochastic Geometry for Modeling, Analysis, and Design of Multi-Tier and Cognitive Cellular Wireless Networks: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* – 2013. – Vol. 15, no. 3. Pp. 996 – 1019.
41. *ElSawy H., Hossain E., Alouini M.S.* Analytical Modeling of Mode Selection and Power Control for Underlay D2D Communication in Cellular Networks // *IEEE Transactions on Communications.* – 2014. – Vol. 62, no. 11. Pp. 4147–4161.
42. Ericsson Mobility Report. – 2019. URL: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2019/ericsson-mobility-report-june-2019.pdf> (accessed 24.06.2019).
43. ETSI EN 102 962: Intelligent Transport Systems (ITS); Framework Public Mobile Network. – 2012.
44. *Feng W., Li Y., Niu Y., Su L., and Jin D.* Multicast spatial reuse scheduling over millimeter-wave networks // *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC).* – 2017. – Pp. 317–322.
45. *Gaidamaka Yu., Pechinkin A., Razumchik R., Samouylov K., Sopin E.* Analysis of an MG1R queue with batch arrivals and two hysteretic overload control policies // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science.* – 2014. – Vol. 24, no. 3. Pp. 519–534.
46. *Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S.A., Riza M., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye.* On the Temporal Effects of Mobile Blockers in Urban Millimeter-Wave Cellular Scenarios // *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* – 2017. – Vol. 66, no. 11. – Pp. 10124 – 10138.
47. *Gelenbe E.* G-networks: a unifying model for neural and queueing networks //

- Annals of Operations Research. – 1994. – Vol. 48, no. 5. – Pp. 433–461.
48. *Girici T., Zhu C., Agre J.R., and Ephremides A.* Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints // Journal of Communications and Networks. – 2010. – Vol. 12, no. 1. – Pp. 30–42.
49. *González M.C., Hidalgo C. A., and Barabási A. L.* Understanding individual human mobility patterns // Nature. – 2008. – Vol. 453. Pp. 779–782.
50. *Gudkova I., Samouylov K, Buturlin I., Borodakiy V., Gerasimenko M., Galinina O., Andreev S.* Analyzing impacts of coexistence between M2M and H2H Communication on 3GPP LTE System // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2014. – Vol. 8458, Pp. 162–174.
51. *Haenggi M, Andrews J., Bacelli F., Dousse O. and Franceschetti M.* Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks // IEEE JSAC. – 2009. - Vol. 27, no. 11. – Pp. 1029–1046.
52. IEEE Standard 802.11ad-2012: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6392842/> (accessed 31.03.2019).
53. ITU-R, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Recommendation ITU-R. P. 1238-9 – 2017. – p. 28.
54. *Iversen V.B.* Teletraffic engineering and network planning // ITU-D. – 2011. – Pp. 567.
55. *Kelly F.P.* Reversibility and Stochastic Networks // New York: J. Wiley & Sons. – 1979. – Pp. 630.
56. *Khatibi S.* Radio Resource Management Strategies in Virtual Networks // PhD. – University of Lisbon. – 2016 p.
57. *Khatibi S., Caeiro L., Ferreira L., Correia L., Nikaiein N.* Modelling and implementation of virtual radio resources management for 5G Cloud RAN // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2017.

- Vol. 128. – 16 p.
58. *Kim W., Song T., Pack S.* Rate adaptation for directional multicast in IEEE 802.11 Ad Networks in Consumer Electronics // IEEE International Conference. – 2012. – Pp. 364–365.
59. *Kislitsyn A.A., Orlov Y.N., Moltchanov D.A., Samuylov A.K., Chukarin A.V., Gaidamaka Y.V.* On the distribution of the stationary point of significance level for empirical distribution function // International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems: Proc. of the 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Moscow, Russia. – 2019. – IEEE Computer Society. – Pp. 1–5.
60. *Kovalchukov R., Moltchanov D., Begishev V., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., and Samouylov K.* Improved session continuity in 5G NR with joint use of multi-connectivity and guard bandwidth // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2018. Pp. 1–7.
61. *Lisovskaya E., Moiseeva S., Pagano M.* The Total Capacity of Customers in the Infinite-Server Queue with MMPP Arrivals // Communications in Computer and Information Science. – 2015. – Vol. 678. – Pp. 110–120.
62. *Low T. P., Pun M.O., Hong Y.W.P., and Kuo C.C.J.* Optimized opportunistic multicast scheduling (OMS) over wireless cellular networks // IEEE Transaction on Wireless Communications. – 2009. – Vol. 9, no. 2. – Pp. 791–801.
63. *Malak D., Al-Shalash M.* Device-to-Device Content Distribution: Optimal Caching Strategies and Performance Bounds // IEEE ICC Workshop on Device-to-Device Communication for Cellular and Wireless Networks. – 2015. – Pp. 664–669.
64. *Martikainen O., Halonen R.* Model for the benefit analysis of ICT // Proc. of the 17-th Americas Conference on Information Systems (AMCIS 2011). – 2011. – Pp. 1–10.
65. *Mezzavilla M., Zhang M., Polese M., Ford R., Dutta S., Rangan S., Zorzi M.* End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks // IEEE Comm. Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, no. 3. – Pp. 2237 – 2263.

66. *Militano L., Condoluci M., Araniti G., Molinaro A., Iera A., Muntean G.-M.* Single frequency-based device-to-device-enhanced video delivery for evolved multimedia broadcast and multicast services. *IEEE Transactions on Broadcasting*. – 2015. – Vol. 61, no. 2. – Pp. 263–278.
67. *Mohd Ramli H.A., Sukor M.A.* Performance Analysis on Automated and Average Channel Quality Information (CQI) Reporting Algorithm in LTE-A // 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). – 2016. – Pp. 256–260.
68. *Moiseev A., Nazarov A.* Queueing network $MAP-(GI-\infty)^K$ with high-rate // *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 254. Pp. 161–168
69. *Moiseev A., Nazarov A., Paul S.* Asymptotic Diffusion Analysis of Multi-Server Retrial Queue with Hyper-Exponential Service // *Mathematics*. 2020. Vol. 8, № 4. Pp. 531-1-531-16.
70. *Moltchanov D., Samuylov A., Petrov V., Gapeyenko M., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye.* Improving session continuity with bandwidth reservation in mmWave communications // *IEEE Wireless Communications Letters*. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – Pp. 105 – 108.
71. *Montalban J., Scopelliti P., Fadda M., Iradier E., Desogus C., Angueira P., Murroni M., and Araniti G.,* Multimedia Multicast Services in 5G Networks: Subgrouping and Non-Orthogonal Multiple Access Techniques // *IEEE Point-to-multipoint communications and broadcasting in 5G*. – 2018. – Vol. 56, no. 3. – Pp. 91–95.
72. *Mumtaz S., Huq K.M.S., Ashraf M.I., Rodriguez J., Monteiro V., Politis C.* Cognitive vehicular communication for 5G. *IEEE Communications Magazine*. – 2015. – Vol. 53, no. 7. – Pp. 109–117.
73. *Naumov V., Beschastnyi V., Ostriкова D., and Gaidamaka Yu.* 5G New Radio System Performance Analysis Using Limited Resource Queuing Systems with Varying Requirements // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2019. – Vol. 11965. Pp. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-030-36614-8_1.

74. *Naumov V., Samouylov K.* Analysis of multi-resource loss system with state-dependent arrival and service rates // *Probability in the Engineering and Informational Sciences.* – 2017. – Vol. 31, No. 4. – Pp. 413–419.
75. *Ostrikova D., Rinaldi F., Beschastnyi V., Gudkova I., Militano L., Araniti G., Iera A., Samouylov K.* Analytical Model for Multicast Subgrouping in 5G-Mobile eMBMS Environment // *International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems: Proc. of the 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Munich, Germany.* – 2017. – USA, New Jersey, Piscataway, IEEE. – Pp. 13–19.
76. *Park H., Park S., Song T., and Pack S.* An incremental multicast grouping scheme for mmWave networks with directional antennas // *IEEE Communication Letters.* – 2013. – Vol. 17, no. 3. – Pp. 616 – 619.
77. *Petrov V., Moltchanov D. and Koucheryavy Y.* Interference and SINR in Dense Terahertz Networks // *Proc. IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall).* – 2015. – Pp. 1437–1442.
78. *Petrov V., Samuylov A., Begishev V., Moltchanov D., Andreev S., Samouylov K., and Koucheryavy Y.* Vehicle-Based Relay Assistance for Opportunistic Crowdsensing over Narrowband IoT (NB-IoT) // *IEEE Internet of Things journal.* – 2017. – Pp.3710–3723.
79. *Petrov, V., Solomitchii D., Samuylov A., Lema M.A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Andreev S., Naumov V., Samouylov K., Dohler M.* Dynamic Multi-Connectivity Performance in Ultra-dense Urban mmWave Deployments // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* – 2017. – Vol. 35, no. 9. Pp. 2038–2055.
80. *Petrov, V., Lema M.A., Gapeyenko M., Antonakoglou K., Moltchanov D., Sardis F., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., and Dohler M.* Achieving End-to-End Reliability of Mission-Critical Traffic in Softwarized 5G Networks // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* – 2018. – Vol. 36, no. 3. Pp. 485–501.
81. *Piro, G., Orsino, A., Campolo, C., Araniti, G., Boggia, G., Molinaro, A.* D2D in

- LTE vehicular networking: system model and upper bound performance // Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2015. – Pp. 281–286.
82. *Ross K.W.* Multiservice loss models for broadband telecommunication networks // Springer-Verlag. – 1995. – 343 p.
83. *Qiaoyang Y., Al Shalash M., Caramanis C., Andrews J.G.* Device-to-Device Modeling and Analysis with a Modified Matern Hardcore BS Location Model // IEEE Communication Theory Symposium. – 2013. Pp. 1825–1830.
84. Qualcomm. mmWave 5G NR prototype demo video. – May 2018. URL: <https://www.qualcomm.com/videos/mmwave-5g-nr-prototypedemo-video> (accessed 31.03.2019).
85. *Rappaport T.* Wireless Communications: Principles and Practice. – Prentice Hall. – 2002. 707 p.
86. *Rhee W., and Cioffi J.* Increase in capacity of multiuser OFDM systems using dynamic subchannel allocation // Proc. IEEE 51st Efficient frequency domain packet scheduler for point-to-multipoint transmissions in LTE networks Vehicular Technology Conference (VTC-Spring). – 2000. – Pp. 1085–1089.
87. *Rosenberg, J.* Requirements for Management of Overload in the Session Initiation Protocol. RFC 5390. – 2008. 14 p.
88. *Samouylov K. and Gaidamaka Y.* Analysis of loss systems with overlapping resource requirements // Statistical Papers. – 2018. – Vol. 59, no. 4. Pp. 1463–1470.
89. *Samouylov K., Naumov V., Sopin E., Gudkova I., Shorgin S.* Sojourn time analysis for processor sharing loss system with unreliable server // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 9845 LNCS. – 2014. – Pp. 284–297.
90. *Samouylov K.E., Gudkova I.A., and Ostrikova D.Yu.* On capturing and modelling stochastic nature in the multicast subgroup formation problem in 3GPP LTE network // Материалы XV Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование»

- ИТММ–2016. – 2016. – Ч. 1. – С. 54–56.
91. *Samouylov K.E., Gudkova I.A., and Ostriкова D.Y.* Modelling and performance analysis of multicast file repair in 3GPP LTE networks // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. Pp. 383 – 392.
92. *Samuylov A., Beschastnyi V., Moltchanov D., Ostriкова D., Gaidamaka Yu., Shorgin V.* Modeling Coexistence of Unicast and Multicast Communications in 5G New Radio Systems // 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, Turkey. – 2019. – Pp. 1163–1168.
93. *Samuylov A., Moltchanov D., Krupko A., Kovalchukov R., Moskaleva F., Gaidamaka Yu.* Performance Analysis of Mixture of Unicast and Multicast Sessions in 5G NR Systems // 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT – 2018). Moscow, Russia. – 2018. – Pp. 1–7.
94. *Samuylov A., Moltchanov D., Gaidamaka Yu., Andreev S., Koucheryavy Ye.* Random Triangle: A Baseline Model for Interference Analysis in Heterogeneous Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2016. – Vol. 65, no. 8, art. no. 7275184. – Pp. 6778–6782.
95. *Shafi M., Molisch A.F., Smith P.J., Haustein T., Zhu P., De Silva P., Tufvesson F., Benjebbour A., Wunder G.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2017. – Vol. 35, no. 6. Pp. 1201–1221.
96. *Tien A. Nguyen H.L.* Centralized and distributed architectures of scalable video conferencing services // Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Jeju Island, Korea. – 2010. – Pp. 394–399.
97. *Venugopal K., Valenti M.C., Heath R.W.* Analysis of Millimeter Wave Networked Wearables in Crowded Environments // Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. – 2015. – Pp. 1–7. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421261.

98. *Vinel A.* 3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: which technology is able to support cooperative vehicular safety applications? // *IEEE Wireless Communication Letters.* – 2012. – Vol. 1, no. 2. – Pp. 125–128.
99. *Абаев П.О., Бесчастный В.А.* К анализу плотности распределения устройств D2D-сети // *Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конф. г. Москва 18-22.04.2016.* – М. изд-во РУДН, 2016. – С. 71–73.
100. *Абаев П.О., Бесчастный В.А., Гайдамака Ю.В.* О применении пространственных точечных процессов в решении оптимизационных задач для беспроводных сетей с установлением прямых соединений // *Современные информационные технологии и ИТ-образование: Материалы конф. г. Москва.* – М. изд-во МГУ, 2015. – Т. 2. – № 11. – С. 160–165.
101. *Абаев П.О., Бесчастный В.А., Самуйлов К.Е.* Аппроксимация распределений расстояний в процессах твёрдого ядра // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь: Материалы Девятнадцатой международной науч. конф. г. Москва 21-25.11.2016.* – М. изд-во РУДН, 2016. – С. 17–25.
102. *Абаев П.О., Бесчастный В.А., Царев А.С.* Анализ модели D2D сети на основе пространственных процессов твердого ядра // *Патент № 2016617463 (РФ; Программа, база данных).* – 2016.
103. *Абаев П.О., Бесчастный В.А., Царев А.С.* Расчет параметров аппроксимирующих распределений расстояний до ближайших соседей в пространственном процессе твердого ядра // *Патент № 2016617403 (РФ; Программа, база данных).* – 2016.
104. *Башарин Г. П.* Лекции по математической теории телетрафика. – М.: РУДН, 2009. – 342 с.
105. *Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А.* Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета // М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1989.

– 336 с.

106. *Бесчастный В. А., Гайдамака Ю. В.* Модель обслуживания трафика одноадресных и многоадресных соединений высокочастотной сети 5G // Современные информационные технологии и ИТ-образование. Теоретические вопросы информатики, прикладной математики, компьютерных наук и когнитивно-информационных технологий. – 2019. – С. 263–273.
107. *Бесчастный В.А., Гудкова И.А.* Расчет вероятностных характеристик дискретной модели с групповым обслуживанием для анализа схемы доступа транспортных средств к ресурсам беспроводной сети // Патент № 2018612267 (РФ; Программа, база данных). – 2018.
108. *Бесчастный В.А.* Дискретная модель с групповым обслуживанием для анализа схемы доступа транспортных средств к ресурсам беспроводной сети // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конф. г. Москва 24-28.04.2017. – М. изд-во РУДН, 2017. – С. 101–103.
109. *Бесчастный В. А., Острикова Д.Ю., Гайдамака Ю. В.* Анализ производительности систем «новое радио» сети 5G с помощью СМО с переменными требованиями к ресурсу // Системы и средства информатики, Т. 29, № 4, 2019. – С. 73–83.
110. *Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Гудкова И.А.* Расчет средней скорости передачи данных по технологии мультимедиа устройствами межмашинного взаимодействия в беспроводной сети // Патент № 2018612389 (РФ; Программа, база данных). – 2018.
111. *Бесчастный В.А., Удодова А.Э., Острикова Д.Ю.* Расчет вероятностных характеристик модели обслуживания трафика одноадресных соединений в сети на базе технологии «Новое Радио» // Патент № 2020611158 (РФ; Программа, база данных). – 2020.
112. *Бесчастный В.А., Холодова О.В., Острикова Д.Ю.* Расчет вероятностно-

- временных характеристик модели обслуживания гетерогенного трафика высокочастотной сети с механизмом множественного подключения // Патент № 2020610409 (РФ; Программа, база данных). – 2020.
113. *Бородакий В.Ю., Гудкова И.А., Острикова Д.Ю.* Анализ предоставления услуг мультимедиа в сетях LTE в виде системы с групповым обслуживанием // Т-Сотт – Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – № 11. – С. 50–53.
114. *Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И.* Стохастические системы с корреляционными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. – М.: Техносфера, 2018.
115. *Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е.,* Сети связи пост-NGN // СПб: БХВ-Петербург. – 2013. – 160 с.
116. *Клейнрок Л.* Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений. – М.: Наука. – 1970. – 256 с.
117. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания: Учебник. – М.: Машиностроение. – 1979. – 518 с.
118. *Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А.* Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2008. – 296 с.
119. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
120. *Моисеева С.П., Панкратова Е.В., Убонова Е.Г.* Исследование бесконечнолинейной системы массового обслуживания с разнотипным обслуживанием и входящим потоком марковского восстановления // Вестник Томского государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2016. – № 2. – Вып. 35. – С. 46 – 53.
121. *Москалева Ф.А., Бесчастный В.А., Самуйлов А.К., Молчанов Д.А., Гайдамака Ю.В.* Построение модели обслуживания двух типов трафика точкой доступа

- в диапазоне mmWave // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ 2019). – 2019. – С. 1–7.
122. *Москалева Ф. А., Платонова А. А., Бесчастный В. А., Гайдамака Ю. В.* Вероятность блокировки и вероятность сброса сессии мультимедиа в миллиметровом диапазоне // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конф. г. Москва 15-19.04.2019. – М. изд-во РУДН, 2019. – С. 160–164.
123. *Назаров А.А., Тертугов А.Ф.* Теория вероятностей и случайных процессов // Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – С. 204.
124. *Наумов В. А., Самуйлов А. К.* Модель выделения ресурсов беспроводной сети объемами случайной величины // Вестник РУДН. Серия: Математика, информатика, физика. – 2015. – № 2. С. 38–45.
125. *Полин Е. П., Моисеева С. П., Рожкова С. В.* Асимптотический анализ неоднородной системы массового обслуживания $M|M|$ в марковской случайной среде // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – Т. 47. С. 7 – 83.
126. *Половов М.П., Гудкова И.А., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю.* Расчет оптимальной скорости передачи данных в сети с технологией мультимедиа методом перебора // Патент № 2018662172 (РФ; Программа, база данных). – 2018.
127. *Половов М.П., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Гудкова И.А.* Численный анализ оптимальной скорости передачи данных в сети с технологией мультимедиа методом перебора // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конф. г. Москва 16-20.04.2018. – М. изд-во РУДН, 2018. – С. 143–145.
128. *Пшеничников А.П., Васькин Ю.А., Степанов М.С.* Распределение канального

- ресурса при обслуживании мультисервисного трафика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2009. – Т. 3. – № 4. – С. 46–48.
129. *Рыков В.В., Самуйлов К.Е.* К анализу вероятностей блокировок ресурсов сети с динамическими многоадресными соединениями // Электросвязь. – 2000. – № 10. – С. 27–30.
130. *Савич В.Н., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Гудкова И.А.* Модель мобильности в виде СЕМО с «пассивным» узлом // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конф. г. Москва 16-20.04.2018. – М. изд-во РУДН, 2018. – С. 154–156.
131. *Савич В.Н., Гарибян А.А., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Гудкова И.А.* Расчет средней суммарной скорости передачи данных и оптимального количества подгрупп пользователей в модели сети с технологией мультивещания и переменными работающими мобильными устройствами // Патент № 2018661885 (РФ; Программа, база данных). – 2018.
132. *Скрипкин В.С., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю.* Численный анализ скорости передачи данных в беспроводной сети с разделением пользователей на подгруппы мультивещания // Информационные технологии и математическое моделирование: Материалы XVII Международной конф. имени А.Ф. Терпугова г. Томск 10-15.09.2018. – М: изд-во научно-технической литературы (Томск), 2018. – С. 354–358.
133. *Степанов С.Н.* Основы телетрафика мультисервисных сетей // М.: Изд-во «Эко-Трендз». – 2010. – 392 с.
134. *Степанов С.Н., Степанов М.С.* Построение и анализ обобщенной модели контакт-центра // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 11. – С. 55–69.
135. *Степанов С.Н., Степанов М.С.* Планирование ресурса передачи при совместном обслуживании мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных // Автоматика и Телемеханика. – 2017. – №11. – С. 79–93.

136. *Цитович И.И., Чернушевич А.В.* Расчет стационарных вероятностей трёхпоточковой модели управления доступом к ресурсам БШС с гистерезисами // Информационные процессы. – 2011. – Т. 11. – № 2. – С. 262–276.
137. *Шадрин С.С.* Методология создания систем управления движением автономных колесных транспортных средств, интегрированных в интеллектуальную транспортную среду: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, 2017.
138. *Шкленник М.А., Моисеев А.Н.* Исследование потоков заявок в двухфазной системе массового обслуживания с неограниченным числом приборов и повторными обращениями // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 45. С. 48-58.