



На правах рукописи

МЕДВЕДЕВА ЕКАТЕРИНА ГЕОРГИЕВНА

**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ
МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ТРАФИКА ОДНОРАНГОВЫХ
И МЕЖМАШИННЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ**

05.13.17 – теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов (РУДН)

Гайдамака Юлия Васильевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ)

Степанов Сергей Николаевич,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий Российского университета дружбы народов (РУДН)

Орлов Юрий Николаевич,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Вологодского государственного университета (ВоГУ)

Зейфман Александр Израилевич.

Защита диссертации состоится «13» ноября 2020 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета ПДС 0200.001 на базе Российского университета дружбы народов по адресу: Москва, ул. Орджоникидзе, дом 3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6 (отзывы на автореферат просьба направлять по указанному адресу) или на официальном сайте диссертационных советов РУДН по адресу: <http://dissovet.rudn.ru/>.

Автореферат разослан «___» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ПДС 0200.001



А.В.Демидова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Основопологающим элементом концепции перехода современных беспроводных систем к пятому поколению сетей мобильной связи (5G) является поддержка пиковых нагрузок межмашинных соединений (Machine-to-Machine, M2M) и устройств Интернета вещей (Internet of things, IoT) для обеспечения ряда перспективных востребованных услуг. Поскольку большое число устройств Интернета вещей конкурирует за подключение к сети радиодоступа (Radio Access Network, RAN), для поддержки межмашинных подключений в сетях 5G и IoT в рамках сотовой технологии LTE в стандарте консорциума 3GPP был разработан механизм инициации доступа устройств к сети по так называемому каналу случайного доступа Random Access Channel (RACH), определяющий процедуру установления соединения. Анализ этой процедуры лежит в основе одного из возможных решений проблемы масштабируемости сетей LTE, которая усугубляется в моменты пиковых нагрузок в случае одновременной активации большой группы устройств, когда импульсный поток синхронных запросов может инициировать перегрузку радиоканала на длительный период времени.

Эффективным решением проблемы увеличения пропускной способности сети стало применение на точках доступа беспроводной сети связи технологии многоантенной передачи (Multiple Input Multiple Output, MIMO), позволяющей использовать несколько направленных антенн как на передающей стороне, так и со стороны приемного устройства. При применении этой технологии одновременной передачи данных по нескольким направленным лучам большого радиуса действия дополнительный выигрыш в скорости передачи данных может быть получен за счет использования эффективных сценариев обслуживания. Анализ процессов планирования обслуживания устройств по технологии многоантенной передачи, находящейся сейчас на этапе активного внедрения, посвящено большое число исследований, что свидетельствует об актуальности выбранной тематики.

Особенностью сегодняшних и будущих беспроводных сетей является доминирующий вклад потокового мультимедийного трафика в год от года увеличивающийся объем передаваемых по сети данных. Согласно данным компании CISCO в 2016 году доля потокового видео составляла 73% всего трафика в Интернете, а к 2021 году ожидается рост этого объема более, чем в три раза с 42 Петабайт (ПБ) до более 159 ПБ, что составит 82% Интернет-трафика. В большинстве распределенных систем для распространения потокового видео на смену традиционным сетям типа «клиент-сервер» пришли основанные на равноправных возможностях своих пользователей одноранговые

(или пиринговые, peer-to-peer, P2P) сети. Исследования показали, что в приложениях P2P генерируется до 70% глобального Интернет-трафика. В парадигме сети P2P пользователи взаимодействуют друг с другом, формируя самоорганизующуюся, самоподдерживающуюся сеть для разделения между собой в отсутствие центрального сервера ее ресурсов, таких как вычислительная мощность, емкость для хранения данных и пропускная способность. При этом эволюция технологии P2P привела к появлению разнообразных наложенных на инфраструктуру интернет-услуг, начиная от традиционного файлообмена и передачи видео по запросу (Video-on-Demand, VoD), заканчивая системами потоковой передачи мультимедиа. И если для услуг первого типа качество восприятия пользователя зависит только от времени ожидания начала предоставления услуги, то при организации потоковых услуг непрерывная доставка данных на постоянной скорости играет решающую роль. Основной проблемой здесь становится разработка такой схемы обмена потоковыми данными между пользователями, имеющими ограничения на скорости отдачи, чтобы обеспечить своевременную доставку мультимедийных данных для непрерывного воспроизведения потокового видео.

Ввиду вышеизложенного в диссертацию вошли исследования трех основных направлений: 1) исследование процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа с учетом повторных передач для анализа вероятности и времени установления межмашинного соединения; 2) анализ стратегий обслуживания пользователей в многоантенной системе с точки зрения скорости передачи данных в нисходящем канале от точки доступа к пользователю; 3) исследование непрерывности воспроизведения для схемы обмена многопользовательским потоковым трафиком в одноранговых сетях при разделении пользователей на группы мультивещания.

Степень разработанности. Для анализа характеристик передачи потокового видео в диссертационной работе проведен обзор полученных ранее результатов в области применения математических моделей и методов теории массового обслуживания, а также аппарата теории вероятностей. Основными российскими учеными, внесшими вклад в создание теории и методов тематики исследований, являются Г. П. Башарин, В. М. Вишнеvский, Ю. В. Гайдамака, А. И. Зейфман, А. Е. Кучеряvый, Е. А. Кучеряvый, А. А. Назаров, В. А. Наумов, Ю. Н. Орлов, А. В. Печинкин, А. П. Пшеничников, В. В. Рыков, К. Е. Самуйлов, С. Н. Степанов, И. И. Цитович, а среди зарубежных F. Baccelli, V. V. Iversen, F. P. Kelly, L. Kleinrock, K. W. Ross, Y. Zhou.

Для построения моделей и анализа вероятностных характеристик использованы цепи Маркова (ц.М.) в дискретном времени, системы массового обслуживания с групповым поступлением в дискретном и

непрерывном времени, система массового обслуживания с разделением процессора. В диссертации применялись известные методы российских и зарубежных научных исследователей, среди которых С. Д. Андреев, И. А. Кочеткова, Б. Р. Левин, А. И. Ляхов, С. П. Моисеева, Д. А. Молчанов, О. Н. Ромашкова, В. В. Рыков, К. Е. Самуйлов, Е. М. Хоров, С. Ф. Яшков, F. Baccelli, G. J. Foschini, R. Heath, M. Jankiraman, R. Kumar, C. Oestges, E. Telatar, J. Winters.

Целью диссертационной работы является построение моделей передачи многопользовательского трафика в беспроводных сетях для анализа эффективности установления и обслуживания одноранговых и межмашинных соединений. **Задачи диссертационной работы**, направленные на достижение поставленной цели:

1. Построение модели установления межмашинных соединений с учетом повторной отправки сообщений и анализ вероятностно-временных характеристик процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа, в первую очередь, вероятности успешного установления соединения и среднего времени установления соединения.

2. Разработка модели передачи данных в многоантенной системе и метода анализа показателей эффективности многовариантных стратегий планировщика передачи данных по нисходящему каналу – среднего времени пребывания заявок в системе, средней длины группы заявок, среднего числа групп заявок в системе.

3. Исследование модели одноранговой сети для передачи многопользовательского потокового трафика с учетом разделения потоков для собственного просмотра и для раздачи другим пользователям и оценка вероятностных характеристик передачи.

Научная новизна исследований, представленных в диссертационной работе, заключается в следующем:

1. Модифицированная модель процедуры установления межмашинного соединения по радиоканалу случайного доступа в виде цепи Маркова, в отличие от известных ранее, учитывает повторную передачу служебных сообщений на разных этапах процедуры инициации доступа к радиоканалу, что позволило получить формулы для более точной оценки производительности сети по сравнению с известными моделями.

2. Математическая модель системы многоантенной передачи в виде системы массового обслуживания с групповым входящим потоком, в отличие от известных, построена в дискретном времени, что позволяет при сравнении эффективности стратегий обслуживания пользователей учесть изменение их местоположения.

3. Метод расчета вероятности всеобщей передачи многопользовательского трафика, в отличие от известных, дает возможность оценить эффективность разбиения пользователей на группы

мультивещания с учетом разделения загружаемого пользователем потока для собственного просмотра и потока для раздачи другим пользователям, что позволяет повысить непрерывность воспроизведения потокового видео оборудованием пользователя.

Методы исследования. В диссертационной работе применяются методы теории вероятностей, теории марковских случайных процессов и теории массового обслуживания.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность результатов подтверждается адекватностью выбранных методов цели и задачам исследования, актуальностью и репрезентативностью источников, используемых в работе. О достоверности результатов диссертации свидетельствует сравнительный анализ расчетов для построенных моделей технических систем с соответствующими вычислительными экспериментами, проведенными на базе близких к реальным исходных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные формулы для расчета вероятностных характеристик моделей межмашинных соединений могут быть применены в системах контроля качества обслуживания для обеспечения требований к задержке в офисных или домашних сетях Интернета вещей. Метод оценки эффективности многоантенной передачи для различных стратегий обслуживания пользователей может быть применен при управлении разделением ресурсов системы многоантенной передачи с многопользовательским трафиком для выбора эффективной стратегии обслуживания пользователей. Метод вычисления показателей качества в одноранговых сетях может быть использован операторами услуг вещания потокового видео для формирования алгоритмов раздачи данных и обеспечения высокого качества видео трансляции. Предложенные математические модели могут быть использованы в учебном процессе для студентов магистратуры направлений «Прикладная математика и информатика», «Прикладная информатика», «Фундаментальная информатика и информационные технологии», «Прикладная информатика», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и аспирантов специальностей отрасли «Связь» в качестве иллюстрации применения математического аппарата для анализа современных приложений, предоставляющих услуги в беспроводных сетях.

Часть представленных результатов были получены по рамках работ по грантам РФФИ № 14-07-00090 «Разработка вероятностных моделей и методов исследования информационной технологии передачи данных в одноранговых P2P-сетях», № 15-07-03051 «Формализация моделей и развитие методов анализа вероятностных характеристик инфокоммуникационных межмашинных беспроводных сетей пятого поколения», № 17-07-00845 «Разработка информационной технологии

для анализа и расчета вероятностно-временных характеристик взаимодействия движущихся устройств в беспроводных сетях Интернета вещей», № 18-00-01555 «Комплекс моделей и алгоритмов распределения ресурсов гетерогенной беспроводной сети с подвижными объектами в решении задач цифровизации экономики умного города», № 19-07-00933 «Стохастические модели и задачи оптимизации для разработки информационных технологий виртуализации и управления ресурсами в беспроводных мультисервисных сетях».

Положения, выносимые на защиту.

1. Модифицированная модель в виде цепи Маркова, учитывающая повторные передачи на разных этапах процедуры получения доступа к радиоканалу, позволяет более точно по сравнению с известными методами оценить производительность беспроводной сети для межмашинных соединений, в первую очередь, вероятность успешного установления соединения и среднее время установления соединения.
2. Построенная модель многоантенной системы при передаче многопользовательского трафика в виде системы массового обслуживания с групповым поступлением и ординарным обслуживанием в дискретном времени для различных распределений длины групп поступающих заявок и различных дисциплин обслуживания позволяет проводить сравнение эффективности стратегий обслуживания пользователей в системе с точки зрения основных показателей качества обслуживания, в том числе, времени загрузки файла пользователем.
3. Разработанный на основе теоретико-множественной модели метод расчета вероятности всеобщей передачи многопользовательского потокового трафика позволяет оценить эффективность разбиения пользователей системы потокового видео на группы мультивещания с учетом разделения потоков для собственного просмотра и для раздачи другим пользователям, что позволяет повысить непрерывность воспроизведения потокового видео оборудованием пользователя.

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 построения моделей информационного процесса в одноранговых сетях с многопользовательским трафиком, а также трафиком межмашинных соединений, в области 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»:

п. 1. – «Исследование, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей» в части построения и анализа модели передачи потокового трафика в одноранговых сетях при разделении пользователей на группы мультивещания, а также в части исследования передачи данных в многоантенной системе по нисходящему каналу с учетом различных стратегий обслуживания;

п. 15 – «Исследования и разработка требований к программно-техническим средствам современных телекоммуникационных систем на базе вычислительной техники» в части разработки метода оценки эффективности стратегии обслуживания пользователей с точки зрения времени загрузки файла пользователями и пропускной способности многоантенной систем

п. 16. – «Общие принципы организации телекоммуникационных систем и оценки их эффективности. Разработка научных принципов организации информационных служб по отраслям народного хозяйства. Изучение социально-экономических аспектов информатизации и компьютеризации общества» в части построения модели процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа с учетом повторных передач для большого числа межмашинных соединений и в части построения теоретико-множественной модели передачи потокового трафика в одноранговых сетях.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы по мере их получения были доложены на всероссийских и международных научных конференциях, и семинарах: IX Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» (Москва, МГУСИ, 2015 г.), X Юбилейная международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, МГУ, 2015 г.), VI Всероссийская конференция (с международным участием) «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, РУДН, 2016 г.), XI международный семинар «Applied Problems in Theory of Probabilities and Mathematical Statistics related to modeling of information systems» (Реджо-ди-Калабрия, Италия, 2017 г.), XVI Международная конференция имени А. Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», ИТММ-2017 (Казань, Россия, 2017 г.), Конференция «Телекоммуникационные и вычислительные системы» в рамках Международного форума информатизации МФИ-2017 и Международного конгресса «Коммуникационные технологии и сети» (Москва, Россия, 2017 г.), II Международная конференция

«Future Networks and Distributed Systems ICFNDS» (Амман, Иордания, 2018 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 20 работах [1-20], в том числе в 4-х изданиях, рекомендованных ВАК РФ [1, 4, 8, 14], 6-ти изданиях, входящих в базу данных Scopus [5, 15, 16, 18, 19, 20], среди которых в том числе одно издание [18] из базы данных Web of Science Core Collection.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 112 страницах. Список литературы включает 131 наименование. Текст работы иллюстрируется 30 рисунками и 10 таблицами.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, представлено содержание основных результатов диссертации, дана характеристика результатов по главам, изложена их научная новизна и практическая ценность.

В **главе 1** построена математическая модель процедуры установления межмашинного соединения по радиоканалу случайного доступа в виде цепи Маркова. В разделе 1.1 описана процедура обмена служебными сообщениями Msg 1, Msg 3, Msg 4 между базовой станцией (БС) и оборудованием пользователя, приведены рекомендуемые значения для ограничения на число повторных трансляций согласно стандартам консорциума 3GPP, вводятся обозначения пороговых значений N_i , $i = 1, 3, 4$. В разделе 1.2 построена вероятностная модель с помощью цепей Маркова $\{v_n\}$ над пространством состояний

$$\mathcal{X} = \left\{ (\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \begin{pmatrix} x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \\ y_1, y_2, y_3 \\ z_1, z_2 \end{pmatrix} : \begin{array}{l} x_1 = \overline{0, N_1}, x_5 = \{0, 1\} \\ y_1 = \overline{0, N_3}, y_2 = \{0, 1\}, x_4 \leq y_3 \leq N_3 x_4 \\ z_1 = \overline{0, N_4}, z_2 = \{0, 1\} \end{array} \right\},$$

где x_1 – общее число переданных сообщений Msg 1; x_2 – общее число успешно переданных Msg 1, $x_2 \leq x_1$; x_3 – число достижений порогового значения N_3 ; $0 \leq x_3 \leq x_2$; x_4 – число достижений порогового значения N_4 , $0 \leq x_4 \leq x_2$; x_5 – индикатор последней передачи Msg 1: $x_5 = 1$ при успешной передаче, $x_5 = 0$ при коллизии; y_1 – общее число переданных Msg 3 после последней успешной передачи Msg 1, y_2 – число Msg 3, которые были переданы успешно при последней успешной передаче Msg 1, y_3 – общее число сообщений Msg 3, успешно и неуспешно переданных, но по причине достижения порога N_4 была блокировка запроса доступа; z_1 – общее число переданных Msg 4 после последнего успешно переданного Msg 1, z_2 – число успешно переданных Msg 4 при последней успешной передаче Msg 1. Ц.М. $\{v_n\}$ описывает

$$\begin{aligned}
 &+ x_3 u(z_2)(\Delta_1 + T_{RAR} + W_{RAR} + \Delta_2) + (x_1 - x_2)(\Delta_1 + T_{RAR} + W_{RAR} + W_{BO}) + y_2 u(y_2 z_2)(T_{HARQ} + T_{AM_4}) + \\
 &+ (y_1 - y_2) u(y_2 z_2)(T_{HARQ} + T_{M_1}) + (z_1 - z_2) u(z_2)(T_{HARQ} + T_{M_4}) + z_2 T_{HARQ}
 \end{aligned}$$

Для проверки применимости формул, полученных с помощью аналитической модели, в разделе 1.4 проведен численный анализ с использованием исходных данных из работ предшественников, а также приводится сравнение найденных характеристик с разработанной в рамках диссертационного исследования имитационной моделью. Согласно международным стандартам, максимальное число ретрансляций Msg 1 не превышает 10 раз, Msg 3 и Msg 4 – 5 раз с вероятностью повторной передачи 10%. На рисунке 2 по результатам численного эксперимента с помощью формулы (2) представлен график зависимости вероятности установления успешного соединения от вероятности коллизии преамбулы для случая $N_1 = 10$, $N_3 = N_4 = 5$ при $p_3 = p_4 = \{0, 1; 0, 3; 0, 5; 0, 7; 0, 9\}$. Для оценки среднего времени процедуры установления соединения рассмотрена зависимость длительности процедуры от времени обработки преамбулы для 6 сценариев с различными комбинациями значений $N_1 = N_3 = N_4$ и T_{RAR} , W_{RAR} (рисунок 3).

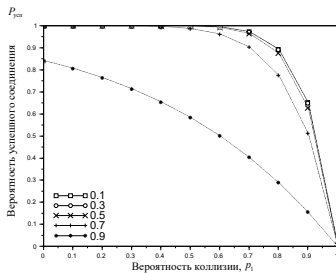


Рисунок 2 – Вероятность установления соединения

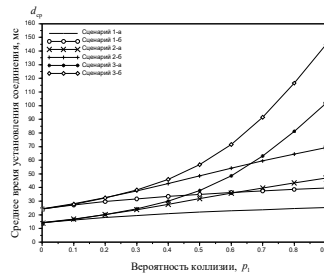


Рисунок 3 – Среднее время установления соединения

Разделы 1.1 – 1.4 содержат данные публикаций [6, 7, 11, 13, 14, 17, 19, 20], полученные с участием автора.

Глава 2 посвящена построению модели передачи данных в многоантенной системе по нисходящему каналу в виде системы массового обслуживания в дискретном времени с групповым поступлением, размером заявки случайной длины и тремя стратегиями обслуживания, а также анализу показателей эффективности – среднего времени пребывания заявок в системе, средней длины группы заявок, среднего числа групп заявок в системе.

В разделе 2.1 рассматривается многопользовательская система в виде точки доступа (ТД) с M_T передающими антеннами, к которой подключены несколько мобильных пользовательских устройств с M_R

приемными антеннами каждый. Рассматривается передача эластичного трафика по нисходящему каналу (downlink), т.е. от ТД к пользователю. Мощность сигнала y_i , принятого i -м пользователем зависит от местоположения пользователя и определяется следующим выражением:

$$y_i = \mathbf{H}_i \mathbf{s} + v_i,$$

где \mathbf{s} – вектор передаваемых комплексных информационных символов размерности $M_T \times 1$, \mathbf{H}_i – матрица каналов комплексных коэффициентов передачи i -го пользователя размерности $M_R \times M_T$, v_i – M_R -мерный вектор независимых одинаково распределенных шумов одинаковой мощности N_0 [дБм] с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , равной $N_0/2$, где N_0 – спектральная плотность мощности шума, так что ковариационная матрица шумов равна $(N_0/2)\mathbf{I}_{M_R}$, \mathbf{I}_{M_R} – единичная матрица размерности $M_R \times M_R$. Предполагается, что мощность сигнала, передаваемого базовой станцией, задана и обозначается P_T [дБм]. В качестве показателя качества восприятия пользователя (Quality of Experience, QoE) рассмотрено среднее время получения услуги, соответствующее времени загрузки пользователем по радиоканалу запрошенных данных в виде файла конечного объема, которое исследуется для трех сценариев обслуживания пользователей как в однопользовательском (сценарий 1 и 2), так и в многопользовательском (сценарий 3) режимах передачи данных. В разделе 2.2 построена модель в дискретном времени с длиной такта Δt в следующих предположениях.

1. Запросы пользователей в направлении ТД на загрузку файла, отправленные в течение текущего такта, поступают на ТД в начале следующего такта одновременно.
2. Для каждого i -го пользователя скорость получения данных, которая зависит от соответствующей его местоположению матрицы канала \mathbf{H}_i , определяется в начале такта и остается неизменной до конца такта. Изменение местоположения каждого пользователя учитывается в момент сразу после начала такта, и в течение одного такта пользователи не перемещаются.
3. Заявки, завершившие обслуживание в течение текущего такта, покидают систему одновременно в конце такта, непосредственно перед началом следующего такта.

Пропускная способность $C(\mathbf{H}_i(t)) = C(\mathbf{H}_i((n-1)\Delta t + 0))$ на такте с номером n , $n = 1, 2, \dots$, $t \in ((n-1)\Delta t, n\Delta t]$, показана на рисунке 4.

На рисунке 5 изображена схема многопользовательской передачи системы при конфигурации $M_T = 2$, обслуживающей 4-х пользователей, каждый из которых имеет $M_R = 2$ приемных антенны для получения данных в виде файла случайной длины, поставленных в очередь на передачу по нисходящей линии.

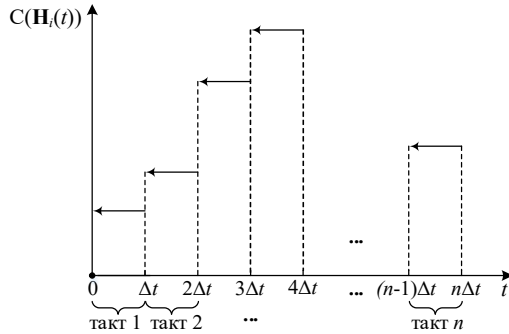


Рисунок 4 – Пропускная способность системы для i -го пользователя

Рассмотрены три сценария, согласно которым на n -м такте, $n \geq 1$, на обслуживание выбирается заявка, которая провела в СМО больше всего времени (сценарий 1 обслуживания в порядке поступления пользователей в систему), или заявка, которая соответствует файлу пользователя с радиоканалом максимальной пропускной способности (сценарий 2 обслуживания пользователя с наилучшей пропускной способностью), или подмножество заявок пользователей, радиоканалы которых в начале такта обеспечивают суммарно максимальную пропускную способность (сценарий 3 обслуживания подмножества пользователей с наилучшей суммарной пропускной способностью).

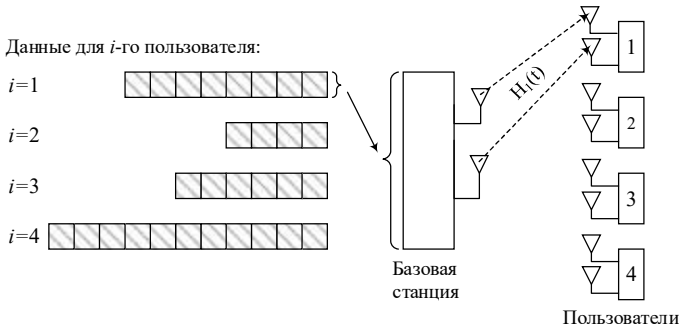


Рисунок 5 – Модель многопользовательской системы MIMO 2×2

Обслуживание пользователей многоантенной системы MIMO описывается случайным процессом (СП) $X_n = (\zeta_n, \mathbf{F}_n, \mathbf{A}_n)$, где ζ_n – с.в. числа заявок в системе на n -м такте, $n \geq 1$, $\mathbf{F}_n = (F_{1n}, F_{2n}, \dots, F_{\zeta_n n})$ – вектор остаточных длин числа ζ_n заявок в СМО, находящихся в системе на n -м такте, вектор $\mathbf{A}_n = (A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{\zeta_n n})$ – вектор времен пребывания ζ_n заявок, находящихся в системе на n -м такте. Под остаточной длиной заявки подразумевается с.в. длины файла [бит] для передачи на n -м такте или оставшаяся для передачи часть файла на последующих тактах.

Построенный СП в дискретном времени $X_n = (\xi_n, \mathbf{F}_n, \mathbf{A}_n)$ исследован с помощью аппарата цепей Маркова, при этом получены стационарные характеристики процесса.

Предположим, что на каждом такте с вероятностью $a = \lambda \Delta t$ ($0 < a < 1$), на ТД поступает запрос пользователя на загрузку файла, причем размер файла является случайной величиной. В каждом файле содержится j ($j \geq 1$) бит (или целое положительное число других условных единиц количества информации) с вероятностью c_j . Считаем, что файл передается от ТД побитово в соответствии с геометрическим распределением времени обслуживания с параметром $b = \mu \Delta t$, $0 < b \leq 1$. Величины $\lambda > 0$ и $\mu > 0$ введены для перехода к рассмотрению аналогичной СМО в непрерывном времени, в которой эти параметры будут иметь смысл интенсивностей поступления и обслуживания, соответственно.

Для математической модели системы в виде СМО $Geo^{[X]}|Geo|1$, в которую поступает группа заявок (или файл), а заявки обслуживаются прибором по одной (побитово), построена однородная ц.м. $\{N(t), t \geq 0\}$, где $N(t)$ – число заявок в системе в момент времени $t = n\Delta t + 0$. Стационарные вероятности ц.м. $p_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P(N(t) = i)$, $i > 0$, и некоторые вероятностно-временные характеристики системы выражены с помощью производящих функций (ПФ). ПФ распределения времени обслуживания имеет вид $\beta(z) = bz / (1 - \bar{b}z)$, $\bar{b} = 1 - b$. Пусть $C(z)$ – ПФ распределения числа заявок в группе с средним \hat{c} .

Утверждение 4. ПФ распределения числа заявок в системе имеет вид

$$P(z) = b(\bar{a} + aC(z)) \left(b\bar{a} - \frac{a(z - (\bar{b}z + b)C(z))}{1 - z} \right)^{-1} p_0, \quad (4)$$

а ПФ времени ожидания начала обслуживания группы заявок определяется формулой

$$w(z) = \frac{1}{\beta(z)} \left(b(\beta(z) - 1)p_0 + (\bar{b}\beta(z) + b)P(\beta(z)) \right). \quad (5)$$

Из утверждения 4 следует, что среднее число заявок в системе имеет вид $N = \frac{a}{b} \cdot \frac{2\hat{c}(1 - a\hat{c}) + C''(1)}{2(1 - \rho)}$, а среднее время ожидания начала

обслуживания группы заявок равно $w = 1 - \rho + \frac{1}{b}(N + \bar{b} - 1)$ и тогда среднее время пребывания группы заявок в системе, соответствующее времени загрузки файла, определяется выражением

$$E[T] = 1 - \rho + \hat{b}(N + \bar{b} - 1) + \hat{c}\hat{b}, \text{ где } \hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{1}{E[C(\mathbf{H})]\Delta t}. \quad (6)$$

Применение СМО $Geo^{[X]}Geo|1|\infty$ в качестве модели для анализа многоантенной системы позволяет учитывать различные распределения с.в. длины группы заявок X , при этом величина $C(\mathbf{H})$ выражена в соответствующих целых условных единицах, например, бит/с. Рассмотрены геометрическое распределение ($\hat{c} = 1/c$, $C''(1) = 2\bar{c}/c^2$) и распределении Пуассона ($\hat{c} = c$, $C''(1) = c^2$) числа заявок в группе с параметром c . Среднее время обслуживания заявки в формуле (6) в силу условия максимальной пропускной способности будет равно

$$\hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{1}{E[\max C(\mathbf{H})]\Delta t}. \quad (7)$$

При подборе исходных данных для численного эксперимента по анализу сценариев загрузки файлов с точки зрения пропускной способности системы в случае обслуживания одного или нескольких пользователей при заданной средней пропускной способности $E[C(\mathbf{H})] = 20 \text{ Мбит/с}$ для ширины полосы 20 МГц и отношения $\text{SNR} = 0 \text{ дБ}$ в разделе 2.3 были получены средние значения пропускной способности $E[\max C(\mathbf{H})]$ для сценария 2 и $E[C_{\text{SumRate}}(\mathbf{H})]$ для сценария 3 в зависимости от числа пользователей. При этом для моделирования перемещения пользователей на каждом такте разыгрывалось случайное приращение элементов канальной матрицы \mathbf{H} , имеющее комплексное нормальное распределение $\text{CN}(0,1)$. В диссертации построены графики зависимости среднего времени пребывания заявки в системе от нагрузки ρ , полученные с помощью формулы (6), на примере трафика UDP для услуги Best Effort. При длине такта $\Delta t = 10^{-8} \text{ с}$ и $N = 10$ для заданной $E[C(\mathbf{H})] = 20 \text{ Мбит/с}$ и найденных средних $E[\max C(\mathbf{H})] = 60 \text{ Мбит/с}$ и $E[C_{\text{SumRate}}(\mathbf{H})] = 85 \text{ Мбит/с}$ параметр b_1 геометрического распределения для сценария 1 обслуживания в порядке поступления в (6) равен $b_1 = 0,2$, для сценария 2 $b_2 = 0,6$ и для сценария 3 $b_3 = 0,85$. Расчеты показали преимущество сценария 3 обслуживания подмножества пользователей с наилучшей суммарной пропускной способностью с точки зрения среднего времени до начала получения услуги пользователем.

В разделы 2.1 – 2.3 вошли исследования, опубликованные в работах [5, 18] с участием автора.

В **главе 3** описаны общие принципы передачи данных в одноранговых сетях, выполнен обзор схем взаимодействия между пользователями и сервером, приведен метод расчета характеристики т.н. состояния «всеобщей передачи», при котором все пользователи получают услугу с надлежащим качеством, с учетом различных

скоростей отдачи пользователей. Раздел 3.1 содержит классификацию одноранговых сетей и описание предложенной схемы разделения потока для собственного просмотра и для раздачи другим пользователям (VUD). В разделе 3.2 построена теоретико-множественная модель системы по схеме VUD, приведены формулы для расчета вероятностно-временных характеристик передачи для сети с двумя типами пользователей, различающихся скоростями отдачи данных. В разделе 3.3 содержится разработанный на основании построенной модели алгоритм расчета вероятности всеобщей передачи, проведен численный эксперимент для сети с малым и большим числом подключенных пользователей, выполнено сравнение модели с классической схемой взаимодействия *isolated channel* (ISO). Эффективность схемы VUD по сравнению со схемой ISO показана на рисунке 6 для одноранговых пользователей со скоростями отдачи 0,5 Мбит/с (60 % пользователей) и 30 Мбит/с (40 % пользователей), просматривающими три канала потокового видео со скоростью 5 Мбит/с.

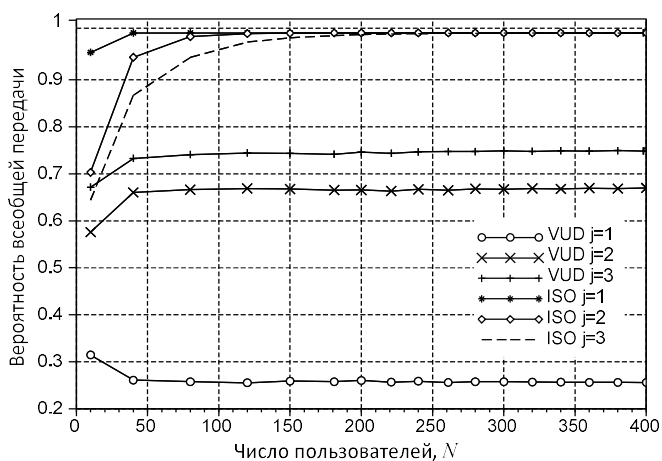


Рисунок 6 – Вероятность всеобщей передачи

Публикации с участием автора [1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 15, 16] легли в основу разделов 3.1 – 3.3.

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

Заключение

1. Модифицирована вероятностная модель в виде цепи Маркова для анализа установления межмашинного соединения по радиоканалу случайного доступа в беспроводных сетях с учетом повторных передач, с помощью которой получен метод расчета вероятности успешного соединения, средней задержки установления соединения. Результаты

аналитической модели верифицированы имитационным моделированием.

2. Разработана модель передачи многопользовательского трафика в нисходящем канале многоантенной системы в виде систем массового обслуживания в дискретном времени и метод оценки эффективности стратегии обслуживания пользователей. Сравнение трёх эффективных стратегий проведено с точки зрения времени загрузки файла пользователями и пропускной способности многоантенной системы.

3. Построена теоретико-множественная модель одноранговой сети для передачи многопользовательского потокового трафика с учетом неоднородности скоростей раздачи пользователей и разделения потоков для собственного просмотра и для раздачи другим пользователям. Разработан метод оценки вероятностей всеобщей передачи для каждого канала и вероятности общесистемной передачи для всех каналов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Гайдамака, Ю.В. Анализ модели многоканальной одноранговой сети вещательного телевидения для схемы с разделением видеопотока / Ю.В. Гайдамака [и др.] // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – 2017. – Т. 25, №2. – С. 123-132.
2. Гайдамака, Ю.В. К анализу параметров качества передачи многоканального потокового трафика в одноранговой сети / Ю.В.Гайдамака, Е.Г.Медведева // Тр. IX конф. «Технологии информационного общества», МТУСИ, 2015. - С.11.
3. Гайдамака, Ю.В. Построение и анализ модели сети P2P TV для схемы с разделением данных на поток для просмотра и поток для раздачи пользователям / Ю.В.Гайдамака, Е.В.Бобрикова, Е.Г.Медведева // Тр. X межд. конф. «Технологии информационного общества», МТУСИ, 2016. – С. 22-23.
4. Гайдамака, Ю.В. Применение жидкостных моделей к анализу одноранговой сети / Ю.В.Гайдамака, Е.В.Бобрикова, Е.Г.Медведева // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». - 2016. - №4. – С.15-25.
5. Горбунова, А.В. Эффективные стратегии обслуживания пользователей в многопользовательской системе ММО / А.В.Горбунова, Е.Г.Медведева [и др.] // Информационно-управляющие системы. - 2019. - № 4. - С. 69–81.
6. Медведева, Е.Г. К анализу вероятности успешного межмашинного соединения по радиоканалу случайного доступа / Е.Г. Медведева [и др.] // Тр. межд. молод. науч. шк. «Молод. науч. шк. по прикл. теор. вер. и телеком. техн. под общ. ред. К.Е. Самуйлова, Е.А. Кучерявого, А.Н. Дудина». М.: РУДН. - 2017. - С. 163-165.
7. Медведева, Е.Г. К анализу вероятности успешного установления соединения по радиоканалу случайного доступа // Тр. XVI межд. конф. им. А. Ф. Терпугова, Ч.1. - Томск: «Издательство НТЛ». - 2017. - С. 95-99.
8. Медведева, Е.Г. К анализу параметров качества передачи мультисканального потокового трафика в одноранговой сети / Е.Г.Медведева, Ю.В.Гайдамака // Свр. информационные технологии и ИТ-образование. 2015. 11(2). С. 192-198.

9. Медведева, Е.Г. К анализу параметров качества передачи одноканального потокового трафика в одноранговой сети / Е.Г.Медведева, Ю.В.Гайдамака, К.А.Агеев // Инф.-телеком. техн. и матем. модел. высокотехн. сист.: тр. Всеросс. конф. с межд. уч. - М.: РУДН. - 2015. - С. 99-102.
10. Медведева, Е.Г. К оценке непроизводительных потерь при передаче потокового трафика в одноранговой сети / Е.Г.Медведева, Ю.В.Гайдамака // Тр. конф. «Телекоммуникационные и вычислительные системы». - 2015. - С. 17-18.
11. Медведева, Е.Г. К процедуре установления соединения по радиоканалу случайного доступа при условии повторной передачи сообщений / Е.Г.Медведева, Э.Ф.Мингажитдинова // Тр. межд. молод. науч. шк. «Молод. науч. шк. по прикл. теории вероят. и телеком. технологиям» под общ. ред. К. Е. Самуйлова, Е. А. Кучерявого, А. Н. Дудина. М.: РУДН. - 2017. - С. 157-162.
12. Медведева, Е.Г. Пример расчета показателей качества р2ptv-сети при схеме с разделением данных на поток для просмотра и поток для раздачи пользователями / Е.Г.Медведева, Ю.В.Гайдамака // Инф.-телеком. технологии и матем. моделирование высокотехн. систем» (ИТТММ-2016). - 2016. - С.104-106.
13. Мингажитдинова, Э.Ф. Анализ вероятности успешного соединения по радиоканалу случайного доступа / Э.Ф.Мингажитдинова, Е.Г.Медведева // Тр. межд. научно-техн. конф. «Телеком. и выч. сист.», - 2017. - С. 44-46.
14. Семенова, О.В. Процедура установления соединения по радиоканалу случайного доступа с возможностью ретрансляции / О.В.Семенова, Е.Г.Медведева [и др.] // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика», 2018. 26(3). С.261-271.
15. Gaidamaka, Yu.V. Design And Software Architecture Of Buffering Mechanism For Peer-To-Peer Streaming Network Simulation / Yu.V.Gaidamaka, E.G.Medvedeva [et al.] // Proc. of 29th European Conference on Modelling and Simulation. - 2015. - P. 682-688.
16. Gaidamaka, Yu.V. Modeling and analysis of the effectiveness of two redistributing schemes in P2P streaming network / Yu.V.Gaidamaka, E.G.Medvedeva, A.Adamu // Proc. of Int. Conf. of Num. Analysis and Appl. Math. - 2016. - P. 090003-1-090003-4.
17. Gudkova, I. Access success probability analysis for MTC communication over 3GPP RACH / I.Gudkova, E.G.Medvedeva [et al.] // Тр. XI межд. сем. «Прикл. пробл. в теор. вер. и мат. стат. под ред. Д. Аранити, К. Самуйлова, С. Шоргина». - 2017 - С.11.
18. Medvedeva, E.G. A discrete queueing model for performance analysis of scheduling schemes in multi-user MIMO systems / E.G.Medvedeva, A.V.Gorbunova, Yu.V.Gaidamaka, K.E.Samouylov // 11th Int. Cong. on Ultra-Modern Telecom. and Control Systems and Workshops (ICUMT). Dublin, Ireland. - 2019. - P. 1-5.
19. Medvedeva, E. Discrete time Markov chain model for analyzing characteristics of RACH procedure under massive machine Type Communications / E.Medvedeva, E.Zaripova, I.Gudkova, O.Semenova, A.Vlaskina, Yu.Gaidamaka // ICFNDS'18: Int. Conf. on Future Netw. and Distr. Syst. ACM, New York. - 2018. - P. 59:1-59:5.
20. Medvedeva, E.G. On the performance measures of LTE radio access procedure under massive M2M communications / E.G.Medvedeva, A.V.Chukarin, V.V.Rykov, Yu.V.Gaidamaka // K.E. Samouylov, L.A. Sevastianov, D.S.Kulyabov (eds.): Sel. pap. of the 12th Int. worksh. on Appl. Probl. in Th. of Prob. and Math. Stat. in the fr. of the Conf. - 2018. - P. 106-114.

Медведева Екатерина Георгиевна (Россия)

Анализ моделей обслуживания многопользовательского трафика одноранговых и межмашинных соединений в беспроводных сетях

В диссертации проведены исследования процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа с учетом повторных передач для анализа вероятности и времени установления межмашинного соединения; анализ стратегий обслуживания пользователей в многоантенной системе с точки зрения скорости передачи данных в нисходящем канале от точки доступа к пользователю; исследование непрерывности воспроизведения для схемы обмена многопользовательским потоковым трафиком в одноранговых сетях при разделении пользователей на группы мультивещания. Для указанных задач построены математические модели, на основе которых разработаны методы и алгоритмы расчета показателей эффективности функционирования беспроводной сети.

Medvedeva Ekaterina (Russia)

Models for analyzing multi-user traffic of peer-to-peer and machine-to-machine connections in wireless networks

In this thesis the following tasks are presented: the analysis of session initiation procedure over a random access radio channel, taking into account retransmissions, to analyze the probability and average time duration of initiation a machine-to-connection; analysis of strategies for serving users in the multi-antenna system in terms of the downlink data rate between the access point and end user; study of the playback continuity for the scheme of exchange of multi-user streaming traffic in peer-to-peer networks when users divides into multicast groups. For these tasks, mathematical models have been built, according to which methods and algorithms for calculating the performance indicators of a wireless network have been developed.