



*На правах рукописи*

**БЕСЧАСТНЫЙ Виталий Александрович**

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

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  
Российского университета 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, доцент,  
профессор кафедры программной инженерии  
Института прикладной математики и  
компьютерных наук, Национальный  
исследовательский Томский государственный  
университет (ТГУ)  
**Моисеев Александр Николаевич.**

Защита состоится « 26 » июня 2020 г. в 15 часов 00 минут на заседании  
диссертационного совета ПДС 0200.001 на базе Российского университета  
дружбы народов, расположенного по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,  
ауд. 219.

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

Автореферат разослан « 23 » мая 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.В. Демидова

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы.** 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. 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 сети многие сходятся во мнении, что единственным жизнеспособным решением является более плотная организация меньших по размеру сот.

Помимо архитектурных решений, в современных сетях необходимы методы повышения спектральной эффективности, без применения которых использование более широкого спектра частот не даст ожидаемого результата. Во многих работах исследуются «расширенные» мультимедийные широкополосные услуги (англ. enhanced Multimedia Broadcast Multicast Services, eMBMS), 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. Тем не менее, большинство проведенных исследований 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 приемо-передающих устройств при анализе технологий одноадресных соединений часто исследуются как отдельные задачи, их значимость для многоадресных систем 5G изучено в гораздо меньшей степени.

Для анализа вероятностно-временных характеристик (ВВХ) схем доступа подвижных пользователей к ресурсам беспроводной сети в многоадресном режиме, таких как средняя задержка передачи данных, вероятность блокировки и вероятность простоя ресурсов, применяются математические модели, при построении и анализе которых используются методы теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Существенный вклад в исследования внесли следующие ученые: Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, В.М. Вишневецкий, Ю.В. Гайдамака, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, А.Н. Моисеев, С.П. Моисеева, Д.А. Молчанов, А.А. Назаров, В.А. Наумов, Ю.Н. Орлов, А.П. Пшеничников, О.Н. Ромашкова, В.В. Рыков, К.Е. Самуйлов,

С.Н. Степанов, И.И. Цитович, J.G. Andrews, L.M. Correia, M. Dohler, E. Gelenbe, M. Haenggi, V.B. Iversen, F.P. Kelly, L. Kleinrock, O. Martikainen, K.W. Ross и др.

В диссертации актуальной задачей является построение моделей массового обслуживания и разработка на их основе новых путей исследования вероятностно-временных характеристик перспективных сетей 5G. 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), установил, что необходимы комплексные модели, которые адекватно описывали бы особенности методов управления доступом и распределением ресурсов сетей 5G.

**Целью диссертационной работы** является построение вероятностных моделей обслуживания мобильных устройств для анализа показателей эффективности и вероятностных методов выделения ресурсов в беспроводных сетях с трафиком многоадресных соединений.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. На основе разработанной математической модели, учитывающей распределение пользователей по уровням качества канала, предложен алгоритм разбиения на группы мультимедиа 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 приемо-передающими устройствами.

**Научная новизна.**

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 массового обслуживания, теории вероятностей, теории случайных процессов,

математической теории телетрафика, стохастической геометрии и имитационного моделирования.

**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 ценность.** Полученные результаты в диссертационной работе могут быть использованы проектными телекоммуникационными компаниями, операторами сетей связи при планировании сетей радиодоступа для 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».

**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

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих 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 персональной, мобильной связи и связи 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.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 13 печатных работах, из которых [1, 2] – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, [3–9] – в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Scopus и/или Springer, [10–12] – в трудах международных и всероссийских научных конференций. Получены восемь свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ [14–21]. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в [1,9,19] – имитационная модель обслуживания трафика одноадресных и многоадресных соединений в высокочастотной сети и численный анализ ВВХ системы; в [2,7,18] – модель обслуживания трафика одноадресных соединений в высокочастотной сети в виде системы массового обслуживания (СМО) с переменными требованиями к ресурсу и численный анализ; в [3,20] – алгоритм оптимизации схемы распределения ресурсов; [4,16] – модель обслуживания трафика колесных транспортных средств в соте сети LTE и численный анализ ВВХ системы; [5,6,21] – модель расположения пользователей беспроводной сети с многоадресной передачей данных для поиска оптимальной конфигурации многоадресных групп в виде замкнутой сети массового обслуживания (СeMO); [8,13,17] – алгоритм нахождения оптимальной схемы распределения радиоресурсов и численный анализ; [10,14] – модель взаимодействия беспроводных устройств для решения задач оптимизации в беспроводных сетях с установлением прямых соединений; [15] –

численный анализ распределений расстояний в процессе твердого ядра. Работа [11] выполнена диссертантом без соавторов. В вышеперечисленных работах соавторам принадлежит: в [1,9,19] – постановка задачи исследования, разработка математической модели и выбор исходных данных моделирования; в [2,7,18] – постановка задачи исследования, метод анализа ресурсной СМО с обслуживанием фазового типа, численный анализ; в [3,20] – разработка аналитической и имитационной моделей; [4,16] – постановка задачи исследований и метод анализа СМО с групповым поступлением и обслуживанием; [5,6,21] – постановка задачи исследования, численный анализ показателей эффективности; [8,13,17] – разработка аналитической модели, выбор исходных данных моделирования; [10,14] – постановка задачи исследований, метод анализа области применения пуассоновского точечного процесса; [15] – метод анализа расстояний в процессах твердого ядра и численный анализ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 108 страницах. Список литературы включает 138 наименований. Текст работы иллюстрируется 38 рисунками и 5 таблицами.

### Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследований, сформулирована теоретическая и практическая ценность работы, представлены выносимые на защиту научные результаты.

В главе 1 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 твердого ядра с точки зрения соотношения сигнал-шум.

В разделе 1.2 проведены построение и анализ модели обслуживания трафика колесных транспортных средств в соте беспроводной сети в виде дискретной СМО с групповым поступлением и обслуживанием. Планировщик базовой станции (БС) может принять запрос на передачу и поместить его в виртуальную очередь, при этом для последующих пакетов планировщик будет автоматически пытаться выделять транспортному средству ресурсные блоки до тех пор, пока оно не выйдет из зоны обслуживания. 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, обеспечиваемую одним выделенным ресурсным блоком. Система моделируется в виде СМО с длиной очереди  $l_r$ , равной количеству временных слотов, в течение которых передаваемая информация является актуальной, и числом обслуживающих приборов  $c$ , равным количеству доступных частотных диапазонов для установления соединений. Число запрашиваемых ресурсных блоков для передачи одного пакета данных с точки зрения теории массового обслуживания определяется последовательностью  $(k, (n(1), \dots, n(k)))$  из  $k$  групп заявок. Следует отметить, что группа не обязательно обслуживается целиком в одном слоте, и, соответственно, заявки, принадлежащие одной и той же группе, могут занимать позиции в нескольких временных слотах. 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 имеющихся групп заявок. Легко заметить, что точки наблюдения образуют вложенную одномерную цепь Маркова  $\{\xi_n, n = 0, 1, \dots, l_r c\}$ , 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  $d_n = \min(\xi_n, c)$ . Таким образом, в случае LAM  $\xi_n = \min(a_n + \xi_{n-1}, c + r) - \min(\xi_{n-1}, c)$ , где уменьшаемое – это число заявок после прихода группы заявок с учетом емкости очереди, в то время как вычитаемое – это число обслуженных заявок в предыдущем слоте; в случае EAM  $\xi_n = \min(a_n + \max(\xi_{n-1} - c, 0), c + r)$ , где первый аргумент – это число заявок в поступивших группах и заявок, которые остались после предыдущего слота, в то время как второй аргумент задает предел для числа заявок с учетом емкости очереди и числа приборов. Оценки времени пребывания группы заявок в системе могут быть 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  $\xi$  заявками приходит группа заявок длины  $h_m$ , такой что  $\xi + h_m > c + r$ , вся группа заявок теряется.

Вероятность  $\gamma_k$  того, что в одном слоте будет сгенерировано ровно  $k$  групп заявок, соответствует схеме Бернулли и может быть найдена по формуле

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

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

Таким образом, можно найти вероятность поступления последовательности  $(k, \mathbf{n})$  в виде

$$P\{k, (n(1), \dots, n(k))\} = \frac{\gamma_k}{M^k} \prod_{m \in M} (\beta_m^g), \quad (2)$$

где  $m \in M$  — индекс качества канала,  $g = \sum_{j=1}^k I\{n(j) = h_m\}$  является числом групп одинаковой длины  $h_m$  в последовательности  $\mathbf{n}$ ,  $\beta_m$  — вероятность запроса на установление соединения из  $m$ -группы, а  $I\{x\}$  — индикатор утверждения  $x$ , такой что  $I\{x\} = 1$ , если  $x$  истинно, и  $I\{x\} = 0$  иначе.

Утверждение 1. Элементы матрицы переходов между состояниями системы определяются следующим образом:

– в случае EAM

$$p_{i,j}^{EAM} = \begin{cases} \alpha_i(j), i = 0, \dots, c+1, j = 0, \dots, c+r-1, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = 0, \dots, c+1, j = c+r, \\ \alpha_i(j-i+c), i = c+1, \dots, c+r, j = i-c, \dots, c+r-1, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = c+1, \dots, c+r, j = c+r, \\ 0, i = c+1, \dots, c+r, j = 0, \dots, i-c-1; \end{cases} \quad (3)$$

– в случае LAM

$$p_{i,j}^{LAM} = \begin{cases} \alpha_i(j), i = 0, \dots, c+1, j = 0, \dots, c+r-1-i, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = 0, \dots, c+1, j = c+r-i, \\ \alpha_i(j-i+c), i = c+1, \dots, c+r, j = i-c, \dots, r-1, \\ \sum_{k=c+r-i}^N \alpha_i(k), i = c+1, \dots, c+r, j = r, \\ 0, i = 1, \dots, c+r, j = \max(c+r-i, r+c), \dots, c+r. \end{cases} \quad (4)$$

Решения уравнения  $\pi_u = \pi_u \mathbf{P}_u$ , где  $u \in \{EAM, LAM\}$ , дают распределения

вероятностей  $\pi_u$  для обеих моделей.

Утверждение 2. Вероятность потери группы  $B_u$  вычисляется по формуле

$$B_u = \frac{\sum_{z=0}^{c+r} \pi_{u,z} \sum_{(k,\mathbf{n}) \in N} P(k,\mathbf{n}) \dim(\mathbf{B}_i(k,\mathbf{n}))}{\sum_{(k,\mathbf{n}) \in N} P(k,\mathbf{n}) k}, \quad (5)$$

где  $u \in \{EAM, LAM\}$ , а  $\mathbf{B}_i(k,\mathbf{n})$  – вектор потерянных групп.

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 (англ., First Come First Served), чтобы учитывать передачу пакетов в зависимости от их требований, накладываемых ограничениями соответствующей предоставляемой услуги.

В *разделе 1.3* исследованы принципы мультивещания, а также методы формирования групп пользователей для оптимизации характеристик обслуживания пользователей беспроводной сети.

В *главе 2* проводится построение и анализ модели движения пользователей для нахождения оптимальной схемы распределения радиоресурсов.

В *разделе 2.1* представлен обзор мультимедийных услуг на базе многоадресной передачи данных.

В *разделе 2.2* построена модель перемещения пользователей для анализа суммарной скорости передачи данных в сети с многоадресной передачей. Рассматривается зона покрытия базовой станции с одной многоадресной группой, состоящей из множества  $M = \{1, \dots, M\}$  абонентов. Обозначим  $S = \{1, \dots, S\}$  набор доступных уровней качества канала связи CQI,  $m_s$  – число пользователей (англ. User Equipment, UE) с качеством канала, соответствующим  $s$ -CQI,  $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_s)$ . Поскольку каждое значение CQI связано с некоторой поддерживаемой схемой модуляции и кодирования MCS, обозначим  $b_s, s \in S$ , объем данных, передаваемых с помощью одного ресурсного блока с использованием схемы модуляции и кодирования, соответствующей  $s$ -му CQI,  $L = \{1, \dots, L\}$ ,  $L \in S$  – набор подгрупп пользователей,  $n_l$  – число ресурсных блоков, выделенных  $l$ -подгруппе,  $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_L)$ . Тогда исследуемая задача оптимизации, целевой функцией которой является средняя суммарная скорость передачи данных, формулируется следующим образом:

$$b(\mathbf{n}, L) = \sum_{l \in L} b_{s_l^{\min}} n_l \sum_{s \in S_1(l)} m_s \xrightarrow{\mathbf{n}, L} \max \quad (6)$$

$$R_1 : \forall i < j, \forall s_1 \in S_1(i), \forall s_2 \in S_1(j) : s_1 < s_2, \quad (7)$$

где  $s_l^{\min} = \min \{s \in S_1(l)\}$  – наименьшее значение CQI в  $l$ -й подгруппе.

Известно, что оптимальное решение задачи может быть получено только при  $L \in \{1, 2\}$ .

Известно, что оптимальное решение задачи может быть получено только при формировании одной или двух подгрупп мультивещания, т.е.  $L \in \{1, 2\}$ .

Обозначим  $\beta_s$  вероятность наступления события, когда пользователь отдаляется от базовой станции и меняет индекс CQI с  $s$  на  $s-1$ ;  $\alpha_s = 1 - \beta_s$  – вероятность события, при котором пользователь приближается к БС 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 уровень CQI. Тогда сценарий с фиксированным числом движущихся пользователей можно моделировать в виде сети массового обслуживания с  $S$  узлами (соответствующими индексам  $s$ -CQI). На каждом узле есть  $M$  приборов, что определяет максимальное число пользователей с одним и тем же значением CQI.

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

$$X(S, M) = \left\{ m : m_i = 0, 1, \dots, M; \sum_{i=1}^S m_i = M \right\}. \quad (8)$$

Утверждение 3. Среднее число попаданий в область  $s$ -CQI рассчитывается по формуле

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

$$h_s = \frac{1}{\beta_s} h_{s-1} - \frac{\alpha_{s-2}}{\beta_s} h_{s-2}, s = 3, \dots, S. \quad (9)$$

Утверждение 4. Стационарное распределение вероятностей  $p(\mathbf{m})$  системы рассчитывается по формуле

$$p(\mathbf{m}) = G^{-1}(S, M) \prod_{s=1}^S \frac{(h_s a_s)^{m_s}}{m_s!}, \quad (10)$$

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

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

$$\bar{b}_1 = \sum_{\mathbf{m} \in X_1(S, M)} b_{s_1}^{\min} N \cdot p(\mathbf{m}). \quad (11)$$

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:

$$\overline{b}_2^1 = \sum_{\mathbf{m} \in X_2(S, M)} b_{s_1}^{\min} \cdot p(\mathbf{m}), \quad (12)$$

$$\overline{b}_2^2 = \sum_{\mathbf{m} \in X_2(S, M)} b_{s_2}^{\min} (N-1) \cdot p(\mathbf{m}). \quad (13)$$

В разделе 2.3 представлен алгоритм нахождения оптимальной схемы распределения ресурсов, условия формирования одной или двух подгрупп мультивещания, а также расчет максимальной суммарной скорости передачи данных, которые можно представить следующим образом:

$$\text{если } B_1(\mathbf{n}) > B_2(\mathbf{n}), \text{ тогда } \begin{cases} b(\mathbf{n}, L, \sigma, \mathbf{k}) = K \cdot b_{s_1(\mathbf{n})} \cdot N, \\ L = 1, \\ \sigma = \{S(\mathbf{n})\}, \\ k_1 = K, \\ B_1 = b_{s_1(\mathbf{n})}; \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{если } B_1(\mathbf{n}) \leq B_2(\mathbf{n}), \text{ тогда } \begin{cases} b(\mathbf{n}, L, \sigma, \mathbf{k}) = 1 \cdot B_1(\mathbf{n}) + (K-1) \cdot B_2(\mathbf{n}), \\ L = 2, \\ \sigma = \{S_1(\mathbf{n}), S_2(\mathbf{n})\}, \\ k_1 = 1, k_2 = K-1, \\ B_1 = b_{s_1(\mathbf{n})}, B_2 = b_{s_2(\mathbf{n})}. \end{cases} \quad (15)$$

Помимо этого, показано, что максимальная суммарная скорость достигается при выделении максимального числа ресурсных блоков  $(K-1)$  второй подгруппе, как показано в (15).

Также в работе рассматриваются другие целевые функции, позволяющие распределять ресурсы более справедливым способом:  $U_1$  – усредненная скорость передачи данных (англ., Fair Data Rate, FDR),  $U_2$  – сбалансированная скорость передачи данных (англ., Balanced Data Rate, BDR), и  $U_3$  – пропорционально справедливая скорость (англ., Proportional Fairness, PF).

$$U_1(\sigma = \{S_1, \dots, S_L\}, \mathbf{k} = (k_1, \dots, k_L)) = \max_{1 \leq l \leq L} (b_{\min(s)} * k_l) - \min_{1 \leq l \leq L} (b_{\min(s)} * k_l) \rightarrow \min, \quad (16)$$

$$U_2(\sigma = \{S_1, \dots, S_L\}, \mathbf{k} = (k_1, \dots, k_L)) = \min_{1 \leq l \leq L} (b_{\min(s)} * k_l) \rightarrow \max, \quad (17)$$

$$U_3(\sigma = \{S_1, \dots, S_L\}, \mathbf{k} = (k_1, \dots, k_L)) = \sum_{1 \leq l \leq L} (\log(b_{\min(s)} * k_l) * \sum_{s \in S_l} n_s) \rightarrow \max. \quad (18)$$

Результаты численного анализа показали, что в случае равномерного и центрированного распределения пользователей по зоне обслуживания функция FDR позволяет найти наилучшую схему распределения ресурсов сети по индексу Джейн. Но в случае, если пользователи распределены ближе к 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.

В главе 3 проведено построение и анализ модели обслуживания трафика одноадресных и многоадресных соединений в высокочастотной сети.

В *разделе 3.1* представлено описание физической модели соты высокочастотной сети. Исследована модель препятствия на линии прямой видимости между приемо-передающими устройствами, предложенная консорциумом 3GPP (англ., 3rd Generation Partnership Project) в UMi модели городского каньона. Также приведены основные упрощающие предположения:

1. начало обслуживания заявок всегда происходит в условиях прямой видимости (англ., Line of Sight, LoS);
2. заявки не могут находиться одновременно в состоянии блокировки прямой видимости до основной и соседней БС.

В *разделе 3.2* разрабатывается модель обслуживания одноадресных соединений базовой станцией высокочастотной сети с блокировками и переключением пользователей на соседние станции в виде СМО с переменными требованиями к ресурсам. Рассмотрим ресурсную СМО с  $N$  приборами и пуассоновским поступающим потоком интенсивности  $\lambda$ . Предположим, что длительности обслуживания заявок не зависят от поступающего потока, независимы в совокупности, и имеют функции распределения фазового типа

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

где  $\mathbf{a}$  – 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 объем требуемого заявке ресурса превышает объем незанятого ресурса, то заявка теряется. Обозначим  $R$  общий объем 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

$$\mathcal{X}(R) = \{(k_1, \dots, k_n) \mid k_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \sum_{j=1}^n k_j \leq N, \sum_{j=1}^n k_j r_j \leq R\}. \quad (19)$$

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

после фазы  $i$ .

Утверждение 5. Система уравнений равновесия (СУР) для процесса  $X(t)$  имеет вид

$$\begin{aligned} & (\lambda I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_i \leq R) a_i + (\mathbf{k}, \boldsymbol{\mu})) p(\mathbf{k}) = \lambda \sum_{i=1}^n I(k_i > 0) p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_i) a_i + \\ & + I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{i0} + \\ & + I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_j > R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{ij} + \\ & + I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{i0} + \\ & + I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_j > R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{ij}, \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R), \end{aligned} \quad (20)$$

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.

Для решения СУР в работе предложен метод последовательных приближений. В качестве начального приближения возьмем равномерное распределение

$$p(\mathbf{k}) = \frac{1}{|\mathcal{X}(N, R)|}, \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R). \quad (21)$$

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

1.  $C := 0$ .

$$\begin{aligned}
2. \quad p(\mathbf{k}) := & \frac{1}{(\lambda I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n I((\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_i \leq R) a_i + (\mathbf{k}, \boldsymbol{\mu}))} \times \\
& \times \left[ \lambda \sum_{i=1}^n I(k_i > 0) p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_i) a_i + I((\mathbf{k}, \mathbf{u}) < N) \sum_{i=1}^n p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{i0} + \right. \\
& + I(\mathbf{k}, \mathbf{u} < N) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I(\mathbf{k}, \mathbf{r} + r_j > R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i) (k_i + 1) \mu_{ij} + \\
& \left. + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I(k_j > 0) I(\mathbf{k}, \mathbf{r} + r_j \leq R) p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) (k_i + 1) \mu_{ij} \right], \quad C := C + p(\mathbf{k}), \\
& \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R). \\
3. \quad p(\mathbf{k}) := & \frac{1}{C} p(\mathbf{k}), \quad \mathbf{k} \in \mathcal{X}(R).
\end{aligned}$$

Одной из ключевых характеристик качества обслуживания является вероятность сброса сессий, которая для рассматриваемой модели вычисляется как

$$B = (\mathbf{a}, \mathbf{b}), \quad (22)$$

где  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)$  – распределение вероятностей начальной фазы обслуживания, а элементы вектора  $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n)$ , т.е. вероятность блокировки в  $i$ -й фазе вычисляется по формуле

$$b_i = \sum_{\substack{\mathbf{k} \in \mathcal{X}(R) \\ (\mathbf{k}, \mathbf{r}) + r_i > R}} p(\mathbf{k}) + \sum_{\substack{j \in \{1, \dots, n\} \setminus i \\ (\mathbf{k}, \mathbf{r}) - r_j + r_i > R}} p(\mathbf{k}), \quad 1 \leq i \leq n. \quad (23)$$

Также исследуется средняя доля используемого ресурса базовой станции при фиксированном и переменном расстоянии до соседних станций (англ. Inter-Site Distance, ISD)

$$UTIL = \sum_{\mathbf{k} \in \mathcal{X}(R)} (\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot p(\mathbf{k}). \quad (24)$$

В разделе 3.3 приводится описание имитационной модели обслуживания одноадресных и многоадресных соединений базовой станцией высокочастотной сети, основанной на принципах дискретно-событийного моделирования. Достижение стационарного режима определяется с помощью метода экспоненциально-взвешенного скользящего среднего с параметром сглаживания, равным 0,05. Также в разделе приводится численный анализ функционирования БС, обслуживающей трафик одноадресных и многоадресных соединений. Рассматриваются вероятности сброса одноадресных и многоадресных сессий (рис. 2), а также средняя доля

используемого ресурса БС при фиксированном расстоянии ISD между базовыми станциями.

Далее проводится анализ вышеперечисленных характеристик при изменении параметра 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 БС приводит к большим требованиям к ресурсам сети в расчете на пользователя, в то время как многоадресные сессии быстрее занимают достаточный объем ресурсов, за счет чего снижается вероятность их сброса. Более того, данный эффект усиливается благодаря приходу хэндовер-сессий от соседних БС.

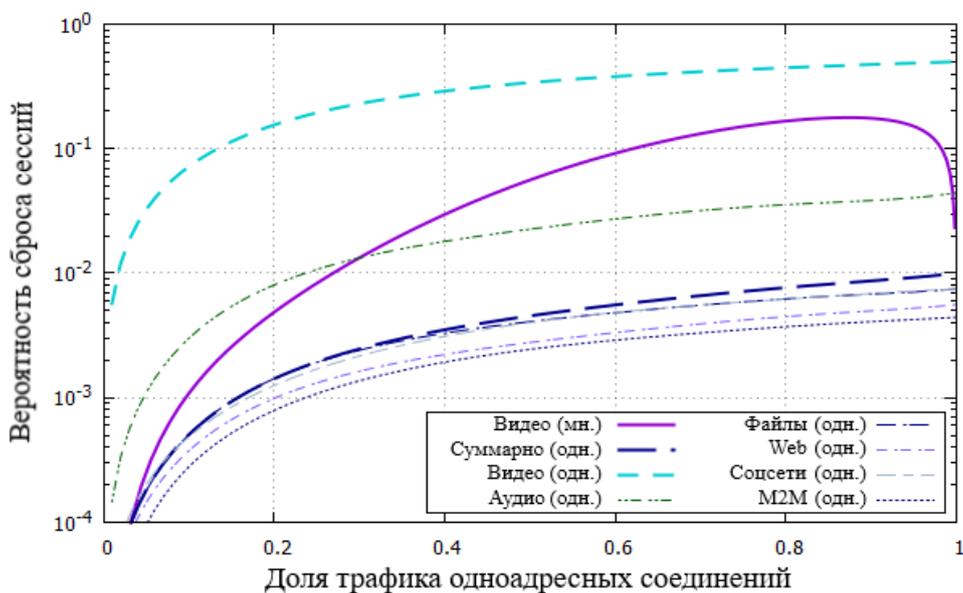


Рисунок 2. Вероятность сброса сессий при обслуживании гетерогенного трафика.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

### Основные результаты работы

1. Разработана модель расположения пользователей беспроводной сети с многоадресной передачей данных для поиска оптимальной конфигурации многоадресных групп в виде замкнутой CeMO, 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.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### ***Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. 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.
2. 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.

#### ***Публикации в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Scopus и/или Springer:***

3. 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. – Pp. 1–5. DOI: 10.1063/1.5114069.
4. 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. DOI: 10.1007/978-3-319-67380-6\_36.
5. 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. – Pp. 1–5. DOI:10.1063/1.5114070.
6. 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.

7. 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.
8. Ostriкова 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. DOI: 10.1109/ICUMT.2017.8255188.
9. 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.

***Материалы международных, всероссийских, молодежных научных конференций***

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Скрипкин В.С., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю. Численный анализ скорости передачи данных в беспроводной сети с разделением пользователей на подгруппы мультимедиа // Информационные технологии и

математическое моделирование: Материалы XVII Международной конф. имени А.Ф. Терпугова г. Томск 10-15.09.2018. – Изд-во научно-технической литературы (Томск), 2018. – С. 354-358.

### ***Прочие публикации***

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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 мультимедиа и переменными работающими мобильными устройствами // Патент № 2018661885 (РФ; Программа, база данных). – 2018.

**Бесчастный Виталий Александрович (Россия)**

**Вероятностные модели обслуживания трафика в беспроводных мобильных сетях с многоадресными соединениями**

В диссертации разработана и проанализирована модель обслуживания трафика транспортных средств в беспроводной сети в виде системы массового обслуживания с групповыми поступлением и обслуживанием в дискретном времени. Разработана математическая модель расположения пользователей беспроводной сети для нахождения оптимальных параметров групп мультивещания в виде замкнутой сети массового обслуживания. Разработан метод анализа показателей эффективности модели точки доступа высокочастотной сети 3GPP New Radio с переключением пользователей на соседние станции в виде системы массового обслуживания ограниченной емкости с переменными требованиями к ресурсам. Проведен численный анализ показателей эффективности обслуживания в высокочастотной сети с помощью методов дискретно-событийного имитационного моделирования.

**Beschastnyi Vitalii (Russia)**

**Probabilistic models of traffic service in wireless mobile networks with multicast transmissions**

In this thesis, a discrete time bulk service queue for analyzing packet scheduling for vehicle-to-anything communications is proposed. To solve the optimization problem of multicast subgrouping in wireless networks, an analytical framework for modeling user movement was developed in the form of closed queuing network. An iterative method of analysis for limited resource queuing systems with varying requirements was proposed allowing for performance measures estimation of 3GPP New Radio systems. The numerical analysis of performance measures was carried out by means of discrete-event simulations.