

*На правах рукописи*

**БЕГИШЕВ ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕГОВИЧ**

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ  
РЕСУРСОВ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ  
С ТРАФИКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВ**

05.13.17 – теоретические основы информатики

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей  
Российского университета дружбы народов.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Самуйлов Константин Евгеньевич**

Официальные оппоненты: профессор, доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры теории вероятностей и  
математической статистики Федерального  
государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Национальный  
исследовательский Томский государственный  
университет» (НИ ТГУ)  
**Моисеева Светлана Петровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры сетей  
связи и систем коммутации Федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Московский  
технический университет связи и информатики»  
(МТУСИ)  
**Степанов Михаил Сергеевич**

Ведущая организация: Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» Российской  
академии наук (ФИЦ ИУ РАН)

Защита диссертации состоится «14» июня 2019 г. в 17 час. 00 мин. на  
заседании диссертационного совета Д 212.203.28 на базе Российского  
университета дружбы народов по адресу: Москва, ул. Орджоникидзе, дом 3,  
ауд. 110.

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 диссоветов РУДН по адресу: <http://dissovet.rudn.ru/> .

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



С. А. Васильев

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность проблемы.** В течение последнего десятилетия объем трафика, который передается по беспроводным сетям, значительно увеличился по сравнению с предыдущими годами. Согласно прогнозам Cisco, повышение показателя в 2017-2019 годах составило более 70%, и в дальнейшем ожидается только его рост. Это связано с зрелостью технологии мобильного широкополосного доступа четвертого поколения (4G), приносящей значительные улучшения во многие аспекты сотовой сети в ряде новых пользовательских приложений и услуг. В частности, технология 4G значительно увеличила предоставленную скорость доступа к данным, поддерживая в то же время широкий набор современных интернет-услуг, тем самым эффективно конкурируя с другими типами беспроводных решений, включая Wi-Fi.

Значительное увеличение пропускной способности радиоинтерфейса указывает на начало новой эры доступа в интернет, и многие считают, что даже самые современные 4G-системы не смогут справиться с лавиной трафика в ближайшем будущем. Такой стремительный рост нагрузки на телекоммуникационные системы может серьезно повлиять на уровень качества обслуживания пользователей (англ. Quality of Service, QoS), а также увеличить дефицит пропускной способности сети.

Ответом на вышеупомянутые вызовы является развертывание более плотных пикосот (радиус покрытия не превышает 500 м) и фемтосот (радиус покрытия до 20 м), поскольку уменьшение зоны покрытия может потенциально обеспечить столь необходимые улучшения в скорости передачи данных пользователям и энергоэффективности различных беспроводных устройств.

Однако возникают дополнительные проблемы, например, помехи между малыми сотами, связанные с интерференцией. В дополнение к проблеме интерференции сотовой индустрии необходимо будет справиться с более высокой арендной платой и увеличенными расходами на обслуживание оборудования, а также решить проблему энергоэффективности аккумуляторов. Тем не менее, тенденция уплотнения сети рассматривается сегодня как основное решение для повышения степени пространственного повторного использования радиочастот с целью удовлетворения постоянно растущего запроса на трафик в системах пятого поколения (5G).

Таким образом, чтобы улучшить эффективность механизма управления ресурсами, необходимо разрабатывать новые модели и методы анализа

эффективности гетерогенных широкополосных беспроводных сетей. Решение данной проблемы сдерживается недостатком теоретических основ, в том числе, в теории массового обслуживания отсутствием адекватных моделей обслуживания и методов их анализа. Актуальными являются задачи управления беспроводными ресурсами при объединении нескольких гетерогенных сетей, например, при комбинации традиционного трафика в лицензируемом спектре LTE и трафика межмашинного взаимодействия в новом нелицензируемом спектре узкополосного интернета вещей NB-IoT. Приложения с комбинированным трафиком повышают надежность и интеллектуальность систем принятия решений. В этих системах сигнал пожарной тревоги или информация о нарушении охраняемого контура, поступившие от сенсоров, должны быть подтверждены видеоматериалом от ближайших камер наблюдения, что предотвратит дорогостоящую реакцию системы на ложное срабатывание сигнализации. При моделировании таких систем выбор стратегии управления ресурсами для их распределения между небольшим числом высокоскоростных видеокамер и огромным числом низкоскоростных сенсоров интернета вещей, в условиях ограниченного объема ресурсов, является на сегодняшний день важной задачей. Следовательно, в рамках такой задачи надежной доставки данных при комбинации гетерогенного трафика необходимо сбалансировать вероятностно-временные характеристики (VBX) сети: вероятность блокировки сессии и коэффициент использования ресурсов. Таким образом, актуальной задачей является построение моделей массового обслуживания и разработка на их основе новых методов исследования VBX гетерогенных сетей 5G. Более того, анализ источников, рекомендаций и стандартов международных организаций, таких как 3GPP, IEEE, ETSI, установил, что необходимы комплексные модели, которые адекватно описывали бы особенности методов управления доступом и механизмов резервирования ресурсов сетей 5G.

Исходя из вышеизложенного, в диссертацию включены результаты исследований по трем основным направлениям: 1) аналитическая оценка характеристик интерференции при прямом взаимодействии устройств на основе стохастической геометрии; 2) моделирование резервирования ресурсов беспроводной сети с трафиком узкополосного интернета вещей; 3) моделирование точки доступа высокочастотной сети с резервированием и

блокировками. Именно эти задачи решены в диссертационной работе, и поэтому тема исследования является актуальной.

Анализ ВВХ обслуживания трафика взаимодействующих устройств проведен с помощью аппарата теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории случайных процессов, теории телетрафика и стохастической геометрии. К российским ученым, исследователям, внесшим большой вклад в эти области, относятся В.М. Вишнеvский, Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Б.С. Гольдштейн, С.Я. Шоргин, А.Е. Кучеряvый, Е.А. Кучеряvый, А.А. Назаров, А.Н. Моисеев, С.П. Моисеева, В.А. Наумов, Ю.В. Гайдамака, А.П. Пшеничников, К.Е. Самуйлов, В.В. Рыков, Д.А. Молчанов, И.И. Цитович, С.Н. Степанов, М.С. Степанов, О.Н. Ромашкова и др., а к зарубежным – M. Dohler, J.G. Andrews, F.P. Kelly, M. Haenggi, V.B. Iversen, L. Kleinrock, E. Gelenbe, Luis M Correia, K.W. Ross и др.

**Целью диссертационной работы** является построение и анализ модели стохастической геометрии для оценки характеристик интерференции, создаваемой пользователями беспроводной сети на принимающем устройстве пользователя, в том числе анализ характеристик случайной величины (с.в.) отношения сигнал/интерференция (англ., Signal-to-Interference Ratio, *SIR*), а также построение аналитической модели системы массового обслуживания (СМО) с резервированием ресурсов с случайными требованиями к объему занимаемого ресурса беспроводной сети.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Аналитическая оценка характеристик интерференции для модели взаимодействия устройств в двух смежных прямоугольных кластерах может быть получена методом стохастической геометрии с учетом вероятностных распределений расстояний между взаимодействующими устройствами.
2. Оценка показателей эффективности модели совместного доступа к ресурсам беспроводной сети в условиях обслуживания трафика узкополосного интернета вещей может быть проведена с помощью модели СМО с последовательным резервированием ресурсов диапазонами фиксированного размера.
3. Анализ показателей эффективности модели точки доступа высокочастотной сети с резервированием ресурсов может быть проведен с помощью Марковской СМО ограниченной емкости с сигналами и случайными требованиями к ресурсам.

### **Научная новизна** диссертационной работы.

1. Построена модель стохастической геометрии для оценки распределения с.в. *SIR* взаимодействующих устройств в беспроводной сети, которая в отличие от известных ранее моделей учитывает геометрию помещений. Получена аналитическая оценка качества сигнала по критерию среднего значения *SIR*, ранее такие исследования проводились с помощью имитационного моделирования.
2. Предложена аналитическая модель для исследования вероятностно-временных характеристик трафика узкополосного интернета вещей в сотовой сети при наличии конкурирующего трафика потокового видео. В отличие от известных ранее, модель учитывает резервирование ресурсов на основе фиксированных диапазонов для трафика узкополосного интернета вещей и стратегии распределения ресурсов с конкурирующим трафиком.
3. Построена модель точки доступа высокочастотной сети с резервированием ресурсов и блокировками прямой видимости. В отличие от известных моделей, рассматривается ресурсная система с механизмом резервирования ресурсов и поступлением сигналов, и применены методы как стохастической геометрии, так и теории массового обслуживания.

**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** диссертационной работы подтверждается использованием строгих и апробированных математических методов исследования, имитационным моделированием и вычислительным экспериментом, проведенным на базе близких к реальным исходных данных.

**Теоретическая и практическая ценность.** Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы проектными телекоммуникационными компаниями, операторами сетей связи при планировании сетей радиодоступа для обеспечения требуемого качества услуг.

Разработанные математические модели, позволяющие оценить величину отношения сигнал/интерференция взаимодействующих устройств, могут быть применены при расчете интерференции в беспроводных сетях, а именно при проектировании беспроводных взаимодействий конечных устройств, в которых

качество полезного сигнала зависит от величины отношения сигнала к интерференции.

Результаты работы включены в исследования по грантам РФФИ № 15-07-03608 «Разработка методов решения задач управления доступом в широкополосных беспроводных инфокоммуникационных сетях на основе нелинейного анализа и математической теории телетрафика», № 18-07-00576 «Построение прикладных вероятностных моделей для анализа показателей эффективности гетерогенных беспроводных сетей с учетом механизмов разделения ресурсов», № 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.

Кроме того, результаты диссертации были внедрены в учебный процесс, дисциплины «Современные концепции управления инфокоммуникациями» и «Современные концепции инфокоммуникаций», читаемые студентам направлений подготовки «Фундаментальная информатика и информационные технологии» в РУДН, и использовались в выпускных работах бакалавров и магистерских диссертациях.

**Апробация работы.** Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: Международная конференция «International Workshop Applied Problems in Theory of Probabilities and Mathematical Statistics related to modeling of information systems, ARTP+MS-2015» (Финляндия, Тампере, август, 2015 г.); XXX Международная конференция «European Conference on Modelling and Simulation ECMS-2016» (Германия, май 2016 г.); XV международная конференция имени А.Ф. Терпугова «Информационные Технологии и Математическое Моделирование, ИТММ-2016» (Алтайский край, сентябрь 2016 г.); XX международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь, DCCN-2017»

(Москва, сентябрь 2017 г.); II международная школа по внедрению технологий, приложений и методов для поколения сетей связи 5G (Португалия, Лиссабон, октябрь, 2018 г.); XXXVII международная конференция «IEEE Global Communications Conference» (Объединённые Арабские Эмираты, декабрь, Абу-Даби, 2018 г.).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 20 печатных изданиях, из которых издания [3, 5] рекомендованы ВАК РФ, а издания [2, 4, 6, 8] входят в базу данных Scopus. Получены свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [9, 10, 11].

В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в [1-3] – формулировка и решение задачи оценки характеристик с.в. *SIR* взаимодействующих устройств; в [5, 6, 7] – модель соты беспроводной сети в виде СМО с трафиком узкополосного интернета вещей при наличии конкурирующего трафика потокового видео, а также формулы для нахождения вероятности потери сессий и среднего времени передачи блока данных; в [6] – метод анализа ВВХ модели с последовательным выделением диапазонов радиоресурсов фиксированного размера; в [4, 8] – модель точки доступа высокочастотной сети с резервированием ресурсов и блокировками прямой видимости. Все выносимые на защиту результаты получены автором лично.

**Объем и структура работы.** Структура диссертации построена из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 129 источников. Научная работа изложена на 115 страницах текста, содержит 24 рисунка и 2 таблицы.

### **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 рассматриваются особенности построения вероятностных моделей взаимодействия устройств в беспроводных сетях, проводится обзор методов анализа моделей.

В разделе 1.1 представлен обзор показателей эффективности функционирования беспроводных сетей, исследованы принципы взаимодействия устройств.

Раздел 1.2 посвящен описанию особенностей прямого взаимодействия устройств D2D (англ., Device-to-Device), как одного из уровней модели

беспроводных сетей 4G/5G. Сделан краткий обзор базовой модели стохастической геометрии, описывающей взаимодействия двух устройств.

Сформулирована задача вычисления характеристик с.в.  $SIR$  при заданных распределениях расстояний между взаимодействующими устройствами. Моделируется взаимодействие устройств, происходящее в пределах т.н. кластеров, например, в кругах определенного радиуса или в прямоугольниках с заданными сторонами. Предполагается, что передающие устройства  $Tx_i$  находятся в геометрических центрах, а принимающие устройства  $Rx_i$  расположены случайно (например, равномерно) в границах соответствующих кластеров. Данная модель соответствует случаю анализа нисходящей линии (англ., downlink). Рассмотрен также случай восходящей линии (англ., uplink), когда в центре кластера находятся принимающие устройства.

В разделе 1.3 предложены две задачи выделения радиоресурсов диапазонами фиксированного размера. В первой задаче построена модель для анализа ВВХ трафика узкополосного интернета вещей (англ., NarrowBand Internet of Things, NB-IoT) при наличии конкурирующего трафика беспроводной сети высокоскоростной передачи данных стандарта LTE (англ., Long-Term Evolution), например, видеопотока данных. Сравниваются три возможные стратегии управления радиоресурсами (рис. 1): статическая (STAT), динамическая (DYN) и динамическая с резервированием (DYNRES). Модель построена в виде СМО с двумя входящими потоками. Первый поток соответствует трафику NB-IoT (далее IoT), а второй – трафику LTE, например, видеопотоку камер наблюдения.

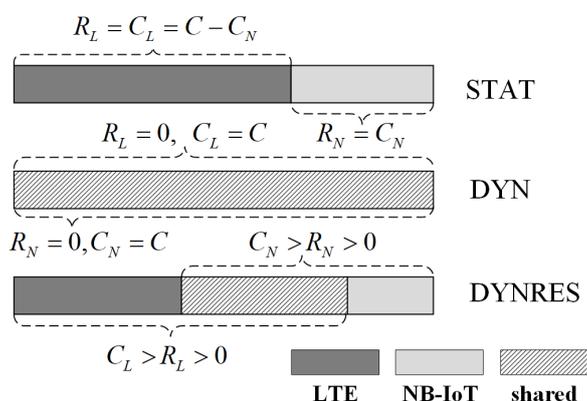


Рис. 1. Стратегии резервирования ресурсов в технологиях LTE/IoT.

Во второй задаче рассматривается базовая станция высокочастотной сети, установленная на высоте  $h_A$  и имеющая зону покрытия радиуса  $r$ . В зоне покрытия расположены пользователи в соответствии с точечным пуассоновским

процессом с интенсивностью  $\lambda$ . Пользователи перемещаются со скоростью  $v$  м/с в зоне обслуживания и моделируются в виде цилиндров с высотой  $h_U$  и радиусом основания  $r_B$ . Сигнал между пользователем и базовой станцией может быть заблокирован (отсутствие прямой видимости) т.н. блокером, интенсивность поступления которых равна  $\lambda_B$ . Предполагается, что высота блокаера составляет  $h_B$  и радиус основания  $r_B$ . Основным показателем эффективности являются вероятность  $\pi_O$  блокировки сессии, которая была уже принята на обслуживание в систему, а также вероятность  $\pi_N$  блокировки новой сессии. Вероятности  $\pi_O$  и  $\pi_N$  необходимо сбалансировать с целью уменьшения числа прерываний сессий. Более подробно обе модели исследованы в главе 3.

В главе 2 построена модель стохастической геометрии для вычисления характеристик с.в.  $SIR$  для устройств, взаимодействующих в квадратных кластерах.

В разделе 2.1 для двух смежных кластеров решена задача расчета характеристик с.в.  $SIR$  (плотность распределения, математическое ожидание и дисперсия), как ключевого показателя эффективности функционирования беспроводной сети. В геометрических центрах кластеров находятся приемники  $Rx_0$  и  $Rx_1$ , а передатчики  $Tx_0$ ,  $Tx_1$  равномерно распределены в пределах кластеров. В такой конфигурации  $Rx_0$  является целевым приемником и  $Tx_1$  интерферирующим передатчиком. Расстояние между  $Tx_0$  и  $Rx_0$ , и между  $Tx_1$  и  $Rx_0$  обозначается  $R_0$  и  $D_1$  соответственно. Предполагается, что  $R_0$  и  $D_1$  с.в. с заданными функциями распределения (ФР) и координаты передатчиков  $Tx_0$  и  $Tx_1$  выбираются независимо друг от друга. Задача состоит в вычислении совместной плотности распределения с.в.  $SIR, R_0, D_1$ . Задача решена аналитически для сценариев взаимодействия устройств по нисходящей и восходящей линиям.

В разделе 2.2 модель взаимодействия устройств в двух кластерах обобщена для случая четырех смежных кластеров (рис.2) и аналитически получена плотность распределения с.в.  $SIR$ . Расположение устройств для случаев на рисунке 2а и 2б такое же как в разделе 2.1. Для D2D сценария (рис.2в) координаты как передатчика, так и приемника равномерно распределены в пределах соответствующего кластера.

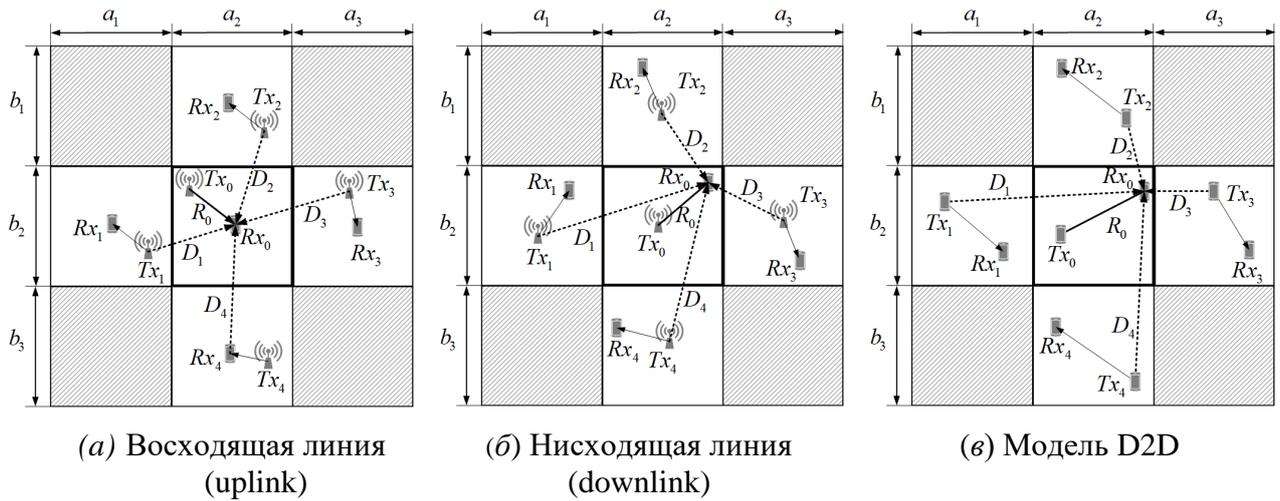


Рис. 2. Сценарии взаимодействия беспроводных устройств.

Утверждение 1. Плотность распределения с. в. *SIR* в четырех смежных квадратных кластерах определяется формулой

$$W_{\xi}(x) = \begin{cases} \int_{M_1} I_1(x, y) dy + \int_{M_3} I_1(x, y) dy, & x < 0, \\ \int_{M_2} I_2(x, y) dy + \int_{M_4} I_2(x, y) dy, & x \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где пределы интегрирования заданы множествами

$$M_1 = \left\{ (x, y): \frac{e^{\alpha \ln 2 - \alpha \ln c}}{x} < y < \frac{e^{\frac{1}{2} \alpha \ln 2 - \alpha \ln c}}{x} \right\}, \quad M_3 = \left\{ (x, y): y < \frac{e^{\alpha \ln 2 - \alpha \ln c}}{x} \right\}, \quad (2)$$

$$M_2 = \left\{ (x, y): \frac{e^{\frac{1}{2} \alpha \ln 2 - \alpha \ln c}}{x} < y < \frac{e^{\alpha \ln 2 - \alpha \ln c}}{x} \right\}, \quad M_4 = \left\{ (x, y): y > \frac{e^{\alpha \ln 2 - \alpha \ln c}}{x} \right\},$$

а подынтегральные выражения имеют вид

$$I_1(x, y) = \left( \arcsin \left[ \frac{c}{2(xy)^{\frac{-1}{\alpha}}} \right] - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{-c^2 + 4(xy)^{\frac{-2}{\alpha}}}}{2(xy)^{\frac{-1}{\alpha}}} \right] \right) / \frac{4y}{\alpha c^2} (xy)^{\frac{-2}{\alpha} - 1} \frac{(y - \tilde{\mu})^2}{2\tilde{\sigma}^2}, \quad (3)$$

$$I_2(x, y_4) = 2\sqrt{2\pi^3} y \cdot \tilde{\sigma}(x \cdot y)^{\frac{-2}{\alpha} - 1} / \alpha c^2 e^{\left( \frac{(y - \tilde{\mu})^2}{2\tilde{\sigma}^2} \right)}. \quad \blacksquare \quad (4)$$

В разделе 2.3 проведен численный анализ моделей из разделов 2.1 и 2.2. Также разработана имитационная модель, основанная на моделировании случайных переменных методом Монте-Карло. Модель позволяет варьировать входные параметры, в том числе, размеры кластеров, коэффициенты затухания

сигналов, количество экспериментов и частоту дискретизации. Выходными параметрами являются эмпирическая плотность, среднеквадратическое отклонение и оценка квантилей основных с. в., в том числе с.в. *SIR*.

В главе 3 в виде СМО построены модели для анализа блокировок в гетерогенных беспроводных сетях с резервированием ресурсов.

В *разделе 3.1* в виде двухпоточковой СМО построена модель соты беспроводной сети, где для передачи блоков данных IoT выделяются ресурсные диапазоны фиксированного размера  $c$ . Все доступные ресурсы делятся между трафиком IoT и LTE. Для трафика IoT и LTE максимально может быть выделено  $C_N = C - R_L$  и  $C_L = C - R_N$  единиц ресурсов, где  $R_N, R_L$  – минимальный объем ресурсов, зарезервированных для IoT и LTE соответственно.

Входящий поток запросов на установление сессий LTE является пуассоновским с интенсивностью  $\nu$ , время их обслуживания распределено по экспоненциальному закону с параметром  $\mu$ , минимальное число ресурсов для установления соединения одной сессии составляет  $d$  единиц. Тогда  $a = \nu/\mu$  – интенсивность предложенной нагрузки запросов LTE. Запросы на установление сессий IoT образуют пуассоновский поток с интенсивностью  $\lambda$ . Длина блока данных IoT имеет экспоненциальное распределение со средним  $\theta$ . Для каждой сессии IoT требуются  $b$  единиц ресурсов. Тогда  $\rho = \lambda\theta$  интенсивность предложенной нагрузки передачи блоков данных IoT.

Обозначим  $m(t)$  и  $n(t)$ ,  $t > 0$  число принятых на обслуживание сессий IoT и LTE соответственно. Тогда состояние системы описывается двумерным Марковским процессом (МП)  $\{m(t), n(t), t > 0\}$  с пространством состояний  $\mathcal{X} = \{m \geq 0, n \geq 0 : nd \leq C - R_N, c(m) \leq C - R_L, nd + c(m) \leq C\}$ , где  $c(m) = c \lceil bm/M \rceil$  – число единиц ресурса для обслуживания сессии IoT, а  $M = \lceil c/b \rceil$  – максимальное число сессий IoT, которые могут обслужены одним диапазоном ресурсов фиксированного размера  $c$ .

Утверждение 2. Вероятности  $p_N$  и  $p_L$  блокировок запросов на установление соединения вычисляются по формулам

$$p_N = \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{R_L}{d} \rfloor} P \left( \left\lfloor \frac{C - R_L}{c} \right\rfloor \frac{c}{b}, n \right) + \sum_{m=\lfloor \frac{R_N}{b} \rfloor}^{\lfloor \frac{C - R_L}{c} \rfloor \frac{c}{b}} P \left( m, \frac{C - mb}{d} \right), \quad (5)$$

$$p_L = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{R_N}{b} \rfloor} p\left(m, \frac{C-R_N}{d}\right) + \sum_{n=\frac{R_L}{d}}^{\frac{C-R_N-1}{d}} \sum_{m=\lfloor \frac{C-(n+1)d}{b} \rfloor + 1}^{\lfloor \frac{C-nd}{b} \rfloor} p(m, n). \quad \blacksquare \quad (6)$$

Из утверждения 2 могут быть получены формулы для вычисления наиболее актуальных показателей эффективности:

- среднее число сессий IoT и LTE, принятых в систему на обслуживание

$$N_N = \sum_{(m,n) \in \mathcal{X}} mp(m, n) = \sum_{m=0}^{\lfloor C_N/b \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor [C_L-c(m)]/d \rfloor} mp(m, n);$$

$$N_L = \sum_{(m,n) \in \mathcal{X}} np(m, n) = \sum_{m=0}^{\lfloor C_N/b \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor [C_L-c(m)]/d \rfloor} np(m, n); \quad (7)$$

- среднее число фиксированных диапазонов, выделенных для запросов IoT

$$S_N = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C-R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\left\lfloor \frac{C-\max\left(\left\lceil \frac{m}{M} \right\rceil c, R_N\right)}{d} \right\rfloor} \left\lceil \frac{m}{M} \right\rceil p(m, n); \quad (8)$$

- среднее число фиксированных диапазонов, выделенных для запросов LTE

$$S_L = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C-R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\left\lfloor \frac{C-\max\left(\left\lceil \frac{m}{M} \right\rceil c, R_N\right)}{d} \right\rfloor} n p(m, n); \quad (9)$$

В разделе 3.2. построена математическая модель резервирования ресурсов с блокировкой сессий на базовой станции высокочастотной сети. Рассматривается СМО с  $N < \infty$  приборами и ограниченным объемом ресурсов  $R_1 < \infty$ . Поток запросов на установление сессии является пуассоновским с параметром  $\lambda$ , длительность сессии экспоненциально распределена с параметром  $\mu$ . Сессия помимо прибора занимает некоторый случайный объем ресурса в соответствии с ФР  $F_R(x)$ . В дальнейшем рассматриваются только дискретные требования к ресурсу, т.е. соответствующие с. в. имеют дискретное распределение  $\{p_r, r \geq 0\}$ . Для обслуживания новых сессий в системе зарезервированы ресурсы объема  $R_0 < R_1$ . Новая сессия принимается в систему, если ей требуется менее  $R_0$  ресурсов и в системе достаточно ресурсов для ее обслуживания. Состояние системы в момент  $t$  описывается МП  $X(t) = (\xi(t), (\eta_0(t), \dots, \eta_{\xi(t)}(t)))$ , где  $\xi(t)$  – число сессий в системе и  $\eta_i(t)$  – объем

ресурсов, занимаемых  $i$ -й сессией. Пусть новая  $(k+1)$ -я сессия требует  $j$  ресурсов с вероятностью  $p_j = P(r_{k+1} = j)$ , тогда сессия будет принята в систему, если  $k < N$  и  $j \leq R_0 - (r_1 + \dots + r_k)$ , иначе сессия будет заблокирована. После окончания обслуживания  $i$ -я сессия освобождает весь объем  $r_i$  занятого ею ресурса. Для каждой сессии, находящейся на обслуживании, может поступить сигнал прерывания, в результате которого сессия мгновенно требует изменения объема занимаемого ресурса. Если требуемый объем увеличивается и ресурсов для обслуживания недостаточно, то сессия будет заблокирована. Таким способом моделируются события блокировки прямой видимости LoS (англ., Line-of-Sight), причем интенсивность  $\alpha$  сигнала прерывания соответствует частоте появления блокера на линии прямой видимости между пользователем и базовой станцией.

Обозначив  $\delta(t) = \eta_0(t) + \dots + \eta_{\xi(t)}(t)$  суммарный объем ресурсов, занятых в момент  $t$ , введем МП  $X(t) = (\xi(t), \delta(t))$  на пространстве состояний  $\mathcal{X} = \bigcup_{k=0}^N \mathcal{X}_k$ , где  $\mathcal{X}_0 = \{(0,0)\}$  и  $\mathcal{X}_k = \{(k,r) : 1 \leq r \leq R_1, p_r^{(k)} > 0\}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , — непересекающиеся подмножества. Здесь  $p_r^{(k)}$  обозначена дискретная свертка вероятностей  $\{p_r, r \geq 0\}$ , которая соответствует вероятности того, что  $k$  сессий занимают  $r$  ресурсов системы.

Пусть в системе обслуживаются  $k$  сессий, занимающие  $j$  ресурсов. Будем считать, что в этом случае  $k$ -я сессия как по окончании обслуживания, так и при прерывании, освободит  $i$  ресурсов с вероятностью  $P_i(k, j) = p_i p_{j-i}^{(k-1)} / p_j^{(k)}$ , т.е. вероятности таких событий вычисляются по формуле Байеса.

Введем стационарное распределение МП  $X(t)$ :  $q_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) = (0,0)\}$ ,  $q_k(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) = (k,r)\}$ ,  $(k,r) \in \mathcal{X}_k$ ,  $1 \leq k \leq N$ . Стационарные вероятности можно вычислить, решая матричные уравнения  $\mathbf{q}^T \mathbf{A} = \mathbf{0}^T$ ,  $\mathbf{q}^T \mathbf{1} = 1$ . Показано, что инфинитезимальная матрица  $\mathbf{A} = [a((i,j), (k,r))]$  МП  $X(t)$  имеет блочную трехдиагональную структуру с основными диагональными блоками  $\Psi_0, \Psi_1, \dots, \Psi_N$ , верхними диагональными блоками  $\Lambda_1, \dots, \Lambda_N$  и нижними диагональными блоками  $\mathbf{M}_0, \dots, \mathbf{M}_{N-1}$ , формулы для вычисления которых определены в утверждении 3.

Утверждение 3. Инфинитезимальная матрица  $\mathbf{A} = [a((i, j), (k, r))]$  МП  $X(t)$

имеет блочный трехдиагональный вид

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \Psi_0 & \Lambda_1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_0 & \Psi_1 & \Lambda_2 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_1 & \Psi_2 & \Lambda_3 & \mathbf{0} & \dots \\ \dots & \mathbf{0} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{N-2} & \Psi_{N-1} & \Lambda_N \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{N-1} & \Psi_N \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Начальные блоки задаются выражениями

$$\Psi_0 = -\lambda \sum_{j=0}^{R_0} p_j, \quad (11)$$

$$\Lambda_1 = (\lambda p_0, \dots, \lambda p_{R_0}, 0, 0, \dots, 0), \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_0 = \left( \mu + \alpha \left( 1 - \sum_{s=0}^{R_1} p_s \right), \dots, \mu + \alpha \left( 1 - \sum_{s=0}^{R_1} p_s \right) \right)^T. \quad (13)$$

Элементы блоков  $\Lambda_n$  вычисляются по формулам

$$\lambda_n(I(n-1, i), I(n, j)) = \begin{cases} \lambda p_{j-i}, & i \leq j \leq R_0, \\ 0, & j < i, \text{ or } j > R_0, \end{cases} \quad (14)$$

где  $(n-1, i) \in \mathcal{X}_{n-1}$ ,  $(n, j) \in \mathcal{X}_n$ .

Элементы блоков  $\Psi_n$ ,  $n = 1, \dots, N-1$  вычисляются по формулам

$$\psi_n(I(n, i), I(n, j)) = \begin{cases} - \left[ \theta(R_0 - j) \lambda \sum_{k=0}^{R_0-i} p_k + n\mu + n\alpha \left( 1 - \sum_{k=0}^i \frac{p_{i-k} p_k^{(n-1)}}{p_i^{(n)}} p_{i-k} \right) \right], & i = j, \\ n\alpha \sum_{k=0}^i \frac{p_{i-k} p_k^{(n-1)}}{p_i^{(n)}} p_{j-k}, & i < j, \\ n\alpha \sum_{k=0}^j \frac{p_{i-k} p_k^{(n-1)}}{p_i^{(n)}} p_{j-k}, & i > j, \end{cases} \quad (15)$$

где  $(n, i) \in \mathcal{X}_n$ ,  $(n, j) \in \mathcal{X}_n$ .

Элементы блоков  $\mathbf{M}_n$ ,  $n = 1, \dots, N-1$  вычисляются по формулам

$$\mu_n(I(n+1, i), I(n, j)) = \begin{cases} (n+1)\mu \frac{p_{i-j} p_j^{(n)}}{p_i^{(n+1)}} + (n+1)\alpha \left( 1 - \sum_{k=0}^{R_1-j} p_k \right) \frac{p_{i-j} p_j^{(n)}}{p_i^{(n+1)}}, & j \leq i, \\ 0, & j > i, \end{cases} \quad (16)$$

где  $(n+1, i) \in \mathcal{X}_{n+1}$ ,  $(n, j) \in \mathcal{X}_n$ .

Элементы блока  $\Psi_N$  вычисляются по формулам

$$\psi_N(I(N, i), I(N, j)) = \begin{cases} - \left[ N\mu + N\alpha \left( 1 - \sum_{k=0}^i \frac{p_{i-k} p_k^{(N-1)}}{p_i^{(N)}} p_{i-k} \right) \right], & i = j, \\ N\alpha \sum_{k=0}^i \frac{p_{i-k} p_k^{(N-1)}}{p_i^{(N)}} p_{j-k}, & i < j, \\ N\alpha \sum_{k=0}^j \frac{p_{i-k} p_k^{(N-1)}}{p_i^{(N)}} p_{j-k}, & i > j, \end{cases} \quad (17)$$

где  $(N, i) \in \mathcal{X}_N$ ,  $(N, j) \in \mathcal{X}_N$ . ■

Следующие утверждения определяют основные вероятностные характеристики системы.

Утверждение 4. Вероятность  $\pi_N$  блокировки новой сессии вычисляется по формуле

$$\pi_N = 1 - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{R_0} q(n, r) \sum_{j=0}^{R_0-r} p_j. \quad \blacksquare \quad (18)$$

Утверждение 5. Вероятность  $\pi_O$  того, что обслуживание принятой в систему сессии будет заблокировано, вычисляется по формуле

$$\pi_O = \frac{\alpha \bar{N} \pi_O^*}{\lambda(1 - \pi_N)}, \quad (19)$$

$$\text{где } \bar{N} = \sum_{n=0}^N \sum_{r=0}^{R_1} n q_n(r), \quad \pi_O^* = \sum_{n=1}^N \sum_{r=0}^{R_1} q_n(r) \sum_{j=0}^r \frac{p_j p_{r-j}^{(n-1)}}{p_r^{(n)}} \left( 1 - \sum_{i=0}^{R_1-r+j} p_i \right). \quad \blacksquare$$

Для проведения численного анализа путем предварительных вычислений были определены исходные данные. Общее количество ресурсов  $R_1 = 278$ . Отношение  $R_0/R_1 = \gamma \in [0, 1]$  введено для определения объема резервирования ресурсов. При вычислении учитываются скорость движения блокеров 3 м/с, высота блокера  $h_b = 1.7$  м и пользователя  $h_u = 1.3$  м, высота базовой станции  $h_A = 4$  м и радиус ее зоны обслуживания  $r = 743$  м.

На рисунке 3 показаны значения вероятностей  $\pi_N$  и  $\pi_O$  при скорости передачи данных 2 Мбит/с. Значения вероятностей увеличиваются с 0.02 до 0.075, причиной чего является частое прерывание связи блокерами, что приводит к возрастанию числа нарушений прямой видимости. Увеличивая значение

величины  $\gamma$  за счет увеличения  $R_0$ , можно достичь сокращения числа прерываний сессий и улучшить производительность системы. Из рисунка 4 видно, что вероятности блокировки как новой сессии, так и принятой, возрастают с увеличением значений  $\lambda$ . При относительно небольшой интенсивности поступления новых сессий можно заметить, что текущие вероятности блокировок сессии почти совпадают для разных значений  $\gamma$ . Из этого следует, что резервирование ресурсов особенно полезно в условиях высокой нагрузки на систему.

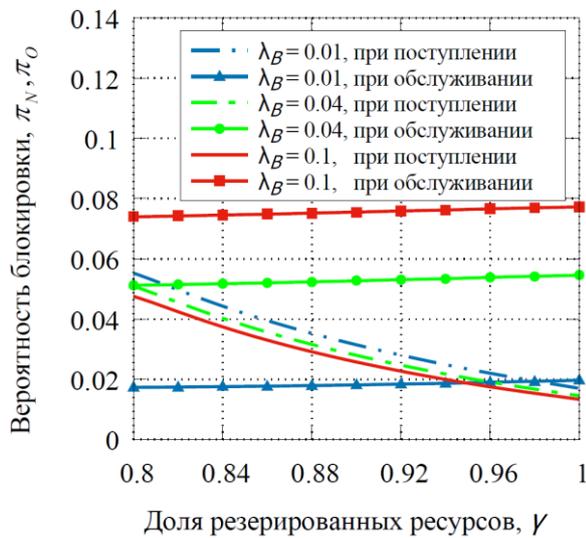


Рис. 3. Вероятность блокировки в зависимости от значений интенсивностей поступления блокеров.

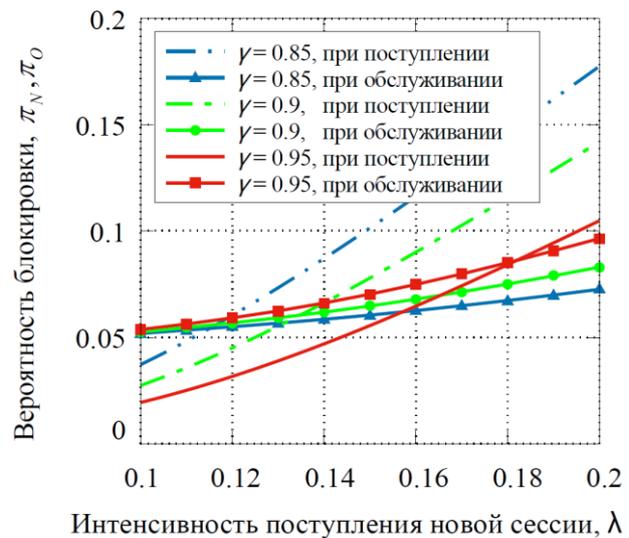


Рис. 4. Вероятность блокировки в зависимости от значений  $\lambda$ .

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

### Основные результаты и выводы

1. Разработана и проанализирована модель стохастической геометрии для оценки характеристик с.в. *SIR* взаимодействующих устройств в смежных прямоугольных помещениях.
2. Разработана математическая модель совместного доступа к ресурсам беспроводной сети в условиях обслуживания трафика узкополосного интернета вещей в виде СМО с последовательным резервированием ресурсов диапазонами фиксированного размера.

3. Разработан метод анализа показателей эффективности модели точки доступа высокочастотной сети 5G с резервированием ресурсов в виде СМО ограниченной емкости с сигналами и случайными требованиями к ресурсам.
4. Проведен численный эксперимент для оценки характеристик с.в. *SIR*, как с помощью аналитической геометрической модели, так и путем имитационного моделирования. Результаты для имитационной модели сходятся с результатами аналитического моделирования.

Основные результаты диссертационного исследования изложены в следующих опубликованных работах:

1. *Бегишев В.О.* Математическая модель для анализа характеристик интерференции при взаимодействии устройств в беспроводной сети // В сб. тр. Молодежной научной конференции «Задачи современной информатики». – М.: ФИЦ ИУ РАН. – 2015. – С. 25–31.
2. *Samuylov A., Ometov A., Begishev V., Kovalchukov R., Moltchanov D., Gaidamaka Yu., Samouylov K., Andreev S., and Koucheryavy Y.* Analytical Performance Estimation of Network-Assisted D2D Communications in Urban Scenarios with Rectangular Cells // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. – 2015. – Vol. 26, Issue 12. – Pp. 1–15. DOI: 10.1002/ett.2999.
3. *Гайдамака Ю.В., Самуйлов А.К., Бегишев В.О., Ковальчуков Р.Н., Молчанов Д.А.* Оценка характеристик интерференции при взаимодействии беспроводных устройств в смежных помещениях прямоугольной формы // *T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт*. – 2015. – №11, Т.9. – С. 41–45.
4. *Begishev V., Samuylov A., Moltchanov D., Machnev E., Koucheryavy Y., Samouylov K.* Connectivity Properties of Vehicles in Street Deployment of 3GPP NR Systems// *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. – 9-13 Dec. 2018. – Pp. 1–7. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644102.
5. *Бегишев В.О., Самуйлов А.К., Молчанов Д.А., Самуйлов К.Е.* Стратегия распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях с трафиком Narrow-Band IoT // *Системы и средства информатики*. – 2017. – № 4, Т. 27. – С. 64–79.
6. *Begishev V., Petrov V., Samuylov A., Moltchanov D., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K.* Resource allocation and sharing for heterogeneous data collection over conventional 3GPP LTE and emerging NB-IoT technologies //

Computer Communications. – Vol. 120. – 2018. – Pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.comcom.2018.01.009.

7. *Begishev V. O., Samuylov A. K., Moltchanov D. A.* Modeling of the NB-IoT service process in 5G networks // В сб. тр. «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2017)». –М.: Техносфера. – 2017. –Pp. 53–53.
8. *Kovalchukov R., Moltchanov D., Begishev V., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K.* Improved Session Continuity in 5G NR with Joint Use of Multi-Connectivity and Guard Bandwidth// 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 9-13 Dec. 2018. – Pp. 1–7. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647608.
9. *Самуйлов К.Е., Бутурлин И.А., Бегисhev В.О.* Расчет оптимальной емкости фиксированного диапазона пропускной способности модели соты сети LTE с трафиком межмашинного взаимодействия. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2014661902, 02.10.2014.
10. *Самуйлов А.К., Самуйлов К.Е., Молчанов Д.А., Бегисhev В.О., Мачнев Е.А.* Симулятор модели беспроводной сети миллиметрового диапазона. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2018661217, 04.09.2018.
11. *Мачнев Е.А., Самуйлов К.Е., Бегисhev В.О.* Модель резервирования ресурсов беспроводной узкополосной сети Интернета вещей. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2018661884, 20.09.2018.

**Бегишев Вячеслав Олегович. (Россия)**

**Вероятностные модели резервирования ресурсов и анализ показателей эффективности беспроводных сетей с трафиком взаимодействия устройств**

В диссертации разработаны вероятностные модели для анализа показателей эффективности функционирования потоковых гетерогенных сетей. Получена аналитическая оценка характеристик интерференции для модели размещения устройств в смежных прямоугольных кластерах с учетом вероятностных распределений расстояний между взаимодействующими устройствами. Исследованы показатели эффективности модели совместного доступа к ресурсам беспроводной сети в условиях обслуживания трафика узкополосного интернета вещей с помощью модели системы массового обслуживания с последовательным резервированием ресурсов диапазонами фиксированного размера. Проведен анализ показателей эффективности модели разделения ресурсов на базовой станции высокочастотной сети с помощью системы массового обслуживания ограниченной емкости с сигналами и случайными требованиями к ресурсам.

**Begishev Vyacheslav (Russia)**

**Stochastic models of resource reservation and analysis of performance measures for wireless network with device-to-device communications traffic**

The thesis developed stochastic models for analyzing the performance measures of streaming heterogeneous networks. An analytical estimate of the interference characteristics is obtained for the device-to-device communication in adjacent rectangular clusters taking into account the probability distributions of the distances between devices. The performance measures of the shared access to the wireless network resources for both NB-IoT and LTE traffic was investigated using a queuing system model with resource reservation and fixed transmission zones. The analysis of the performance measures for the resource sharing model of the mmWave access point was carried out using a finite capacity queuing system with signals and random resource requirements.