

На правах рукописи



**Андреев Сергей Дмитриевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ  
МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА И АЛГОРИТМОВ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ТРАФИКА ДЛЯ  
ГЕТЕРОГЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.12.13 —  
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Научные консультанты: доктор технических наук, профессор  
**Самуйлов Константин Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор  
**Тюрликов Андрей Михайлович**

Официальные оппоненты: **Никульский Игорь Евгеньевич**,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист отдела 133, зам. главного конструктора ОАО «ЦНПО «Ленинец»

**Парамонов Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

**Степанов Сергей Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и систем коммутации ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), г. Москва**

Защита состоится «28» мая 2019 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ауд. 53-01

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» и на сайте <http://guar.ru>

Автореферат разослан «25» февраля 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.233.05,  
кандидат технических наук, доцент

  
Овчинников Андрей Анатольевич

## Общая характеристика работы

В настоящее время развитие телекоммуникационных технологий происходит стремительными темпами, что обусловлено все возрастающим числом пользователей систем мобильной связи и их повышенными потребностями в ресурсах беспроводной сети. Во избежание истощения ограниченных частотно-временных радиоресурсов, имеющихся у современных технологий мобильного доступа, международными комитетами по стандартизации ведется напряженная работа с целью принятия до 2020 года новых спецификаций, определяющих работу сетей связи *пятого поколения* (5G). Для повышения качества обслуживания своих пользователей такие *гетерогенные* беспроводные сети все более тесно интегрируют между собой существующие, а также перспективные технологии радиодоступа, что приводит к возникновению принципиально новых научно-технических задач.

Помимо услуг мобильного доступа, которые предполагают передачу разнородного пользовательского трафика, гетерогенные сети 5G обеспечат поддержку множества приложений Интернета вещей, основанных на принципе межмашинного взаимодействия, а также реализуют технологии программно-определяемых сетей и облачных вычислений. В рамках концепции Интернета вещей возникает все более существенное различие между потребительскими и промышленными сценариями на пути к Индустриальному Интернету. Отдельного внимания заслуживает при этом подключение носимых устройств, которые занимают промежуточное положение между пользовательскими системами и сетями межмашинного взаимодействия. Такое многообразие приложений обуславливает важность обеспечения эффективного функционирования гетерогенных сетей пятого поколения.

Для повышения качества обслуживания в системах 5G потребуются согласованное взаимодействие сотовых технологий радиодоступа, функционирующих в лицензированном диапазоне частот, таких как система LTE комитета 3GPP, с семейством технологий локального доступа IEEE 802.11, использующих нелицензированный спектр и широко известных как WiFi. Эти традиционные системы радиодоступа будут дополнены более современными решениями IEEE 802.11ad/ay (WiGig) и новейшими технологиями 3GPP, такими как «Новое Радио» (New Radio), которые реализуют связь в том числе на крайне высоких частотах. Кроме того, представляет интерес использование прямых соединений между пользовательскими устройствами, что снижает нагрузку на инфраструктурные каналы связи, позволяя перенаправлять трафик из сотовой сети в сети других технологий радиодоступа.

В силу своей исторически сложившейся эволюции различные технологии радиодоступа, входящие в состав гетерогенных беспроводных сетей, подвержены значительной фрагментации и недостаточно интегрированы между собой. Это обстоятельство сдерживает их дальнейшее развитие, а

также обуславливает разрыв между требованиями перспективных пользовательских приложений и эффективностью функционирования современных систем мобильного доступа. Для его преодоления требуется такое управление информационными потоками, которое позволяет балансировать загрузку различных технологий радиодоступа в рамках гетерогенной беспроводной сети. При этом возможно как распределение потоков трафика между сотовой сетью и другими (например, локальными) системами радиодоступа, так и их перенаправление на прямые соединения между устройствами.

Таким образом, согласование работы различных технологий радиодоступа и использование прямых соединений «устройство – устройство» требуют создания новой методологии управления потоками трафика и организации множественного доступа, предоставляющей набор методов для контроля за установлением соединения, назначения мощности передачи и разделения ресурса между пользователями. Соответствующие методы должны обеспечить высокую скорость передачи данных в числе прочих требований к сетям 5G, таких как высокая емкость системы (выраженная, например, в числе одновременно обслуживаемых пользователей), низкая задержка доступа в сеть при установлении соединения или передаче данных, а также приемлемая энергетическая эффективность при доставке трафика (определяемая как объем данных, переданный в расчете на затраченную при этом энергию).

Как следствие, необходим комплексный подход, учитывающий основные особенности современного этапа развития гетерогенных беспроводных систем мобильного доступа, такие как высокая плотность размещения пользовательских устройств и узлов сетевой инфраструктуры, тесная интеграция разнородных технологий радиодоступа и использование прямых соединений между устройствами, а также применение крайне высоких частот и обеспечение поддержки приложений Интернета вещей с учетом особенностей носимых устройств. В результате возникает **важная научно-техническая проблема** по созданию моделей и алгоритмов для обеспечения эффективного функционирования гетерогенных беспроводных сетей. Ее всестороннему решению и посвящена тема данной диссертационной работы, что определяет ее актуальность.

Таким образом, **актуальными являются** разработка и исследование *моделей* организации коллективного использования ресурса для гетерогенных беспроводных сетей в условиях высокой плотности размещения устройств с целью оценки показателей качества обслуживания, а также создание эффективных *алгоритмов* управления информационными потоками с целью снижения нагрузки на сотовую сеть методом перенаправления трафика в сети других технологий радиодоступа.

С учетом вышеизложенного целесообразно кратко охарактеризовать **разработанность темы исследования**. В частности, значительный

вклад в развитие данной тематики внесли следующие российские и зарубежные ученые и исследователи.

– Теория массового обслуживания и теория телеграфика – Г.П. Башарин, В.М. Вишневецкий, Ю.В. Гайдамака, А.Н. Дудин, А.Е. Кучерявый, Е.В. Морозов, В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов, С.Н. Степанов, Г.Г. Яновский, V.B. Iversen, F. Kelly и др.

– Методы анализа на основе стохастической геометрии – Р.В. Амбарцумян, И.И. Цитович, А.Н. Ширяев, J.G. Andrews, F. Vaccioli, M. Haenggi, R.W. Heath, E. Hossain и др.

– Модели множественного доступа и методы передачи данных – Н.Д. Введенская, Е.А. Крук, А.И. Ляхов, И.Е. Никульский, А.И. Парамонов, А.М. Тюрликов, С.Г. Фосс, Б.С. Цыбаков, M. Dohler, G.V. Giannakis, L. Kleinrock и др.

Кроме того, имеется множество технических публикаций, включая спецификации и руководящие документы по разработке мобильных систем связи и гетерогенных сетей различных поколений вплоть до пятого.

Под *множественным доступом* в работе понимается организация коллективного использования ресурса многими пользователями (см. одноименную статью, подготовленную Б.С. Цыбаковым [Вероятность и математическая статистика : Энциклопедия / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. — М. : Большая Рос. Энцикл., 1999. — 910 с.]).

Под *управлением потоками трафика* понимается их перенаправление между различными технологиями радиодоступа в рамках гетерогенной беспроводной сети с целью снижения нагрузки на сотовую сеть, которое далее называется «выгрузкой» трафика.

**Объектом** исследования является *гетерогенная беспроводная сеть* с набором технологий радиодоступа при высокой плотности размещения устройств, а **предмет** исследования составляют модели множественного доступа для гетерогенной беспроводной сети и алгоритмы управления потоками трафика с целью снижения нагрузки на сотовую сеть радиодоступа. **Целью диссертации** является разработка и исследование моделей множественного доступа для оценки показателей качества обслуживания в гетерогенных беспроводных сетях с набором технологий радиодоступа в условиях высокой плотности размещения устройств, а также разработка и исследование алгоритмов перенаправления информационных потоков для снижения нагрузки на сотовую сеть методом выгрузки трафика в сети других технологий радиодоступа.

Для достижения цели в диссертационной работе решаются следующие крупные **задачи**.

1. Разработка и исследование моделей множественного доступа пользователей для гетерогенных беспроводных сетей с набором технологий радиодоступа в условиях высокой плотности размещения устройств с целью оценки параметров качества обслуживания, что включает в себя:

- моделирование гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа;
- моделирование гетерогенной сети с возможностью установления прямых соединений между устройствами;
- моделирование сети радиодоступа для обслуживания большого числа устройств;
- моделирование сети радиодоступа для обслуживания множества носимых устройств.

2. Разработка и исследование алгоритмов перенаправления потоков трафика с целью снижения нагрузки на сотовую сеть радиодоступа, а также оценка их характеристик в гетерогенных беспроводных сетях с учетом обслуживания потоков трафика от взаимодействующих устройств, что включает в себя:

- создание алгоритма с разделением пользовательской сессии для совмещенной сети радиодоступа;
- создание алгоритма с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры;
- создание и реализацию протокола управления системой прямых соединений для гетерогенной сети;
- создание алгоритма распределения трафика пользователей в гетерогенной системе прямых соединений.

**Научная новизна** диссертации состоит в следующем.

1. Модель гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа, которая, в отличие от известных, учитывает геометрию размещения узлов сети совместно с особенностями обслуживания потоков трафика (сессий) пользователей во времени.

2. Алгоритм с разделением пользовательской сессии для совмещенной сети радиодоступа, который отличается от известных тем, что позволяет вести передачу трафика по нескольким технологиям радиодоступа одновременно с целью снижения нагрузки на сотовую сеть.

3. Модель гетерогенной сети с возможностью установления прямых соединений между устройствами, отличающаяся от известных совместным учетом особенностей обслуживания потоков трафика во времени и геометрии размещения пользовательских устройств.

4. Алгоритм с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры, который впервые учитывает возможность блокирования канала прямой видимости подвижными препятствиями при осуществлении пользователями передачи на крайне высоких частотах.

5. Модель сети радиодоступа для обслуживания большого числа устройств, которая отличается от известных тем, что принимает во внимание особенности функционирования протокола случайного множественного доступа, стандартизованного для сотовой системы связи.

6. Модель сети радиодоступа для обслуживания множества носимых устройств, отличающаяся от известных учетом особенностей работы протокола случайного множественного доступа, стандартизованного для локальной системы связи на крайне высоких частотах.

7. Протокол управления системой прямых соединений для гетерогенной сети, а также способ его реализации в рамках модельной сети, которые ранее не применялись для снижения нагрузки на сотовую сеть методом выгрузки трафика в сети других технологий радиодоступа.

8. Алгоритм распределения трафика пользователей в гетерогенной системе прямых соединений, который, в отличие от известных, основан на применении методов сетевого кодирования с целью повышения доступности контента на соседних пользовательских устройствах.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы обусловлена созданием нового научного направления в области разработки и исследования моделей и алгоритмов для обеспечения эффективного функционирования гетерогенных беспроводных сетей. Методология диссертации развивает и объединяет методы теории массового обслуживания и стохастической геометрии, применяя их к современным гетерогенным сетям, и отличается от известных как своим комплексным подходом, так и учетом основных особенностей текущего этапа развития беспроводных систем. В результате предлагаются новые модели организации множественного доступа для пользователей гетерогенных сетей мобильной связи в условиях высокой плотности размещения устройств, а также создаются эффективные алгоритмы управления потоками трафика с целью снижения нагрузки на сотовую сеть передачи данных. Все это вносит существенный вклад, прежде всего, в исследование путей совершенствования управления информационными потоками.

Полученные в работе научные результаты внедрены в Российском университете дружбы народов (РУДН), Москва; Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), Санкт-Петербург; публичном акционерном обществе «ГИПРОСВЯЗЬ», Москва; научно-исследовательском институте радио (ФГУП НИИР), Москва; обществе с ограниченной ответственностью «ЭВС», Санкт-Петербург. Часть результатов диссертации получена при выполнении ряда крупных научно-исследовательских проектов, в том числе при исследованиях по грантам РФ (16-11-10227), РФФИ (17-07-00845, 17-07-00142, 15-07-03051, 10-08-01071), а также при выполнении НИР в рамках госзадания (2.882.2017/4.6) и при создании в РУДН модельной сети лаборатории опережающих исследований сетей 5G (начиная с 2017 г.).

**Практическая значимость** диссертации заключается в разработке для научно-исследовательских, проектных организаций и телекоммуникационных компаний обоснованных рекомендаций, таких как «Методика оценки показателей эффективности для проектирования гетерогенных бес-

проводных сетей» (внедрена в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ»). Результаты работы также легли в основу учебно-методических комплексов для лекционных курсов, постановок задач для выпускных квалификационных работ бакалавров по направлениям подготовки 02.03.01 «Математика и компьютерные науки» и 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», магистров по направлению подготовки 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», программа «Управление инфокоммуникациями и интеллектуальные системы» на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

**Методология исследования**, применявшаяся в диссертационной работе для решения поставленных задач, включает в себя методы теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Для проверки основных положений теоретических исследований использовалось имитационное моделирование, а также проводились натурные испытания в рамках модельной сети.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная модель гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа, учитывающая обслуживание потоков трафика (сессий) от множества пользователей и высокую плотность размещения узлов сетевой инфраструктуры, позволяет оценивать параметры качества обслуживания, такие как среднее число одновременно передающих пользователей и вероятность блокировки их сессий.

2. Предложенный алгоритм с разделением пользовательской сессии применим для управления потоками трафика в гетерогенной сети с двумя совмещенными технологиями радиодоступа, которая характеризуется высокой плотностью размещения узлов сетевой инфраструктуры, и позволяет повысить скорость отправки данных пользователями, а также снизить среднее время их передачи.

3. Разработанная модель гетерогенной сети с двумя одновременно функционирующими технологиями радиодоступа и возможностью установления прямых соединений между соседними устройствами при высокой плотности их размещения применима для оценки параметров качества обслуживания, включающих в себя среднее число одновременно передающих пользователей и вероятность блокировки их сессий.

4. Сформулированный алгоритм с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры в условиях их плотного размещения, учитывающий блокирование канала прямой видимости препятствиями при передаче на крайне высоких частотах, применим для улучшения параметров качества обслуживания, таких как среднее число одновременно передающих пользователей и вероятность блокировки их сессий.

5. Предложенная модель сотовой сети с конкурентным обслуживанием большого числа пользователей, учитывающая особенности протокола множественного доступа, позволяет изучать показатели эффективности функционирования системы связи, включающие в себя среднее число попыток передачи, а также вероятность успешного установления соединения и задержку доступа в сеть.

6. Разработанная модель сети радиодоступа для обслуживания множества плотно размещенных носимых устройств, учитывающая характер потребления ими энергии и особенности протокола конкурентного доступа, применима для оценки показателей эффективности функционирования системы связи и, в частности, энергетической эффективности передачи потокового трафика пользователей.

7. Предложенный протокол управления системой прямых соединений для гетерогенной сети с интегрированными между собой технологиями радиодоступа, а также способ его реализации в рамках модельной сети с высокой плотностью позволяют снижать нагрузку на сотовую сеть методом выгрузки трафика в сети других технологий радиодоступа, повышая при этом скорость передачи пользователей.

8. Сформулированный алгоритм распределения трафика пользователей в гетерогенной системе прямых соединений с большим количеством устройств, основанный на применении методов сетевого кодирования и учитывающий структуру передаваемых сессий, применим для управления нагрузкой с целью снижения времени передачи пользовательских данных и повышения вероятности успешного доступа.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждаются корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования, а также широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на международных конференциях. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях и семинарах: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China, 7–10 April 2013; IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Istanbul, Turkey, 7–12 July 2013; Aachen, Germany, 25–30 June 2017; IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Dresden, Germany, 2–5 June 2013; Glasgow, UK, 11–14 May 2015; Porto, Portugal, 3–6 June 2018; IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Seoul, Korea, 6–8 March 2014; European Wireless, Budapest, Hungary, 20–22 May 2015; Oulu, Finland, 18–20 May 2016; Dresden, Germany, 17–19 May 2017; IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 23–27 May 2016; Kansas City, USA, 20–24 May 2018; IEEE Global Communications Conference (Globecom), Washington DC, USA, 4–8 December 2016; Singapore, Singapore, 4–8 December 2017; Abu Dhabi, UAE, 9–13 December 2018; Международная конференция «Распределенные Компьютерные и Телекомму-

никационные Сети: Управление, Вычисление, Связь», Москва, Россия, 17–21 сентября 2018; семинары РУДН, ГУАП, СПбГУТ.

Основные результаты диссертации изложены в 68 опубликованных работах, в том числе в 6 главах в монографиях, в 12 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; в 32 работах, опубликованных в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и шести приложений. Полный объем диссертации составляет 438 страниц, включая 116 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 360 наименований.

Все основные результаты диссертационной работы **получены автором самостоятельно**. Экспериментальные исследования проведены при его участии и под непосредственным научным руководством.

Диссертационная работа выполнена по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 4, 5, 11, 12, 14.

## Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится характеристика разработанности темы исследования, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава описывает развитие систем беспроводной связи в последние десятилетия, которое в значительной степени изменило возможности доступа к сети Интернет и повлекло за собой необходимость решения целого ряда новых исследовательских задач. Разработка мобильных технологий широкополосного доступа четвертого поколения (4G) завершилась в 2011 году и привела к существенным улучшениям во всех аспектах работы беспроводной системы связи. По мере того как соответствующие сотовые технологии получали все более широкое распространение на практике, направление опережающих исследований сместилось в сторону проектирования и разработки мобильных сетей пятого поколения (5G).

Сети 5G предлагают перспективную топологию систем беспроводного доступа, основанную на использовании различных малых сот (см. рисунок 1) и предназначенную для удовлетворения новых требований по емкости и качеству покрытия сети. Такие гетерогенные многослойные покрытия предполагают наличие базового слоя макросот с дополнительными слоями более плотно размещенных сот меньшего размера, таких как пикосоты, фемтосоты, точки доступа WiFi и т.д. Соответственно, базовая станция макросети служит для обеспечения сетевого подключения и поддержки мобильности терминалов на обширных площадях, тогда как малые соты применяются для повышения качества и емкости сотового покрытия.

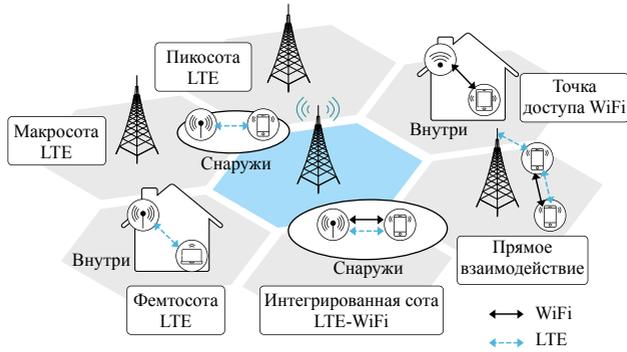


Рисунок 1 — Топология типовой гетерогенной сети

В конце 2015 года комитет 3GPP начал активную работу по созданию новой радиотехнологии New Radio в рамках системы 5G, которая смогла бы функционировать на миллиметровых волнах без обратной совместимости с предыдущими решениями. Одновременно продолжилось дальнейшее развитие имеющейся инфраструктуры 3GPP LTE. При помощи интеграции сетей радиодоступа LTE, WiFi и New Radio система 5G получит возможность обслуживать широкий круг ресурсоемких пользовательских приложений, включая службы определения местоположения абонентов, облачные и социальные сервисы, мультимедиа-услуги высокого разрешения, приложения виртуальной и дополненной реальности и др.

Однако применение сетей 5G не ограничивается услугами, ориентированными на обслуживание людей в качестве пользователей, а предполагает также обеспечить поддержку приложений, построенных на межмашинном взаимодействии (Machine-to-Machine, M2M). Соответственно, дополнительные требования возникают относительно задержки, доступности, надежности, масштабируемости, стоимости и энергетической эффективности связи M2M. С одной стороны, технологии 5G должны будут предоставить задержку на уровне радиодоступа не более 1 мс и работать со скоростями движения узлов до 500 км/ч. С другой стороны, системы связи следующего поколения должны будут обеспечить высокую плотность подключенных устройств, вплоть до  $10^6/\text{км}^2$  с чрезвычайно низким энергопотреблением.

После выполнения всех заявленных требований гетерогенные системы связи 5G станут наиболее современным средством для обслуживания всевозможных приложений Интернета вещей (Internet of Things, IoT), построенного на технологиях межмашинного взаимодействия, и, тем самым, позволят подключить к сети множество различных машин, функционирующих при минимальном вмешательстве человека. Предполагаемые таким образом сценарии применения гетерогенных сетей связи 5G можно условно разделить на три широких класса.

**1. Расширенный мобильный широкополосный доступ.** Мобильный широкополосный доступ нацелен на обслуживание людей в качестве пользователей, получающих доступ к различным мультимедиа-приложениям, услугам и данным. Ожидается, что потребность в поддержке данного вида сервисов продолжит возрастать, а для их обеспечения потребуется дополнительная сетевая емкость. В итоге расширенный мобильный широкополосный доступ позволит осуществить сценарии, в которых смогут функционировать новые пользовательские приложения с повышенными требованиями к производительности, предполагающие более высокое качество восприятия услуги. Для отдельных областей, в которых наблюдается высокая плотность размещения абонентов, важны емкость сети и скорость передачи данных пользователем, тогда как требования по поддержке мобильности являются не такими строгими, как в случае покрытия обширного пространства.

**2. Массовое межмашинное взаимодействие.** Данный класс сценариев характеризуется очень большим числом подключенных устройств, которые при этом передают достаточно малые объемы устойчивых к задержке данных. Требуется, чтобы подобные устройства имели низкую стоимость, а также длительное время работы без перезарядки или замены своей батареи питания. Такие условия являются типовыми для широкого класса взаимодействующих объектов, от несложных бытовых приборов до более продвинутых устройств с расширенными возможностями. Примерами являются мониторинг интеллектуальных энерго- и сельскохозяйственных систем, подключение сенсоров и измерителей, силовых приводов, носимых устройств, камер наблюдения, а также автомобилей нового поколения.

**3. Надежное взаимодействие с низкой задержкой.** Для этого класса сценариев характерны строгие требования к таким показателям работы системы, как ее общая емкость, задержка доставки данных и доступность беспроводного соединения. В качестве примера можно привести беспроводные системы контроля промышленного производства и сопутствующих процессов, удаленного осуществления медицинских услуг, распределения нагрузки в интеллектуальных энергосистемах, обеспечения безопасности дорожного движения и т.д. Подобные условия функционирования требуют организации межмашинного взаимодействия в режиме реального времени для, например, самоуправляемых автомобилей и беспилотных летательных аппаратов, процессов промышленного производства, оперативного контроля и оптимизации систем транспортной безопасности, работы служб чрезвычайного реагирования и ряда других приложений.

Стремительное развитие в этой связи *конвергентной* экосистемы 5G-IoT предполагает, что разнообразные подключенные устройства получат возможность взаимодействовать друг с другом посредством различных технологий радиодоступа, включая те, которые оперируют с более высокими частотами и более широкой полосой пропускания. Для удовлетворения

требований приведенных выше сценариев понадобится согласованное использование различных радиотехнологий, включающее дальнейшее развитие сетей LTE и системы New Radio комитета 3GPP совместно с различными протоколами доступа семейства IEEE, такими как широко распространенные сети WiFi и многочисленные решения для беспроводной связи ближнего радиуса действия.

В результате гетерогенные сети связи 5G объединяют в себе целый ряд усовершенствований и новых функций, предназначенных для увеличения производительности современных беспроводных технологий. Они включают в себя более тесную интеграцию различных технологий радиодоступа и уплотнение сети, использование прямых соединений между устройствами для разгрузки сотовой сети и крайне высоких частот для повышения скорости передачи данных, а также механизмы поддержки приложений Интернета вещей и носимого оборудования. Эти ключевые компоненты гетерогенной экосистемы 5G-IoT становятся предметом рассмотрения последующих глав данной работы.

**Вторая глава** посвящена исследованию совместной работы различных сетей радиодоступа в рамках гетерогенной системы связи на примере технологий LTE и WiFi. В частности, рассматривается взаимодействие точек доступа (ТД) локальной сети WLAN с малыми сотами мобильного оператора. Предлагается модель гетерогенной сети доступа, которая включает в себя покрытие макро- и пикосотами, а также множество ТД WLAN, которые здесь называются слоями. Вначале рассматривается раздельное размещение малых сот LTE и ТД WiFi, а также не предполагается наличие прямого интерфейса взаимодействия между сотовой и локальной сетью доступа.

Разработанная модель гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа одновременно учитывает динамику трафика во времени и геометрию размещения узлов сети. В качестве примера ее применения проводится анализ системы для передачи данных по линии вверх, что представляет собой более интересный для исследования случай в связи с повышенной сложностью учета радиointерференции. Рассматривается типовая макросота радиуса  $R$  с базовой станцией (БС), расположенной в ее геометрическом центре. Также предполагается наличие ТД/БС WLAN и пико-, которые размещены на плоскости вокруг нее.

Предполагается, что передающие терминалы инициируют сессии со средней длительностью  $\mu^{-1}$ , поступающие на обслуживание в гетерогенную сеть доступа согласно пуассоновскому процессу интенсивности  $\lambda$ . Таким образом, новая сессия ставится в соответствие терминалу, находящемуся в определенной точке, которая не меняется на протяжении всей сессии. Рассматриваемый тип трафика задает сессии с минимальной требуемой скоростью передачи данных  $r_0$ , что может соответствовать фрагментам голосовых или видеозвонков в реальном времени. Если некоторая сессия не

может быть принята на обслуживание определенным слоем гетерогенной сети, она становится *заблокированной*.

Поскольку как слой WLAN, так и пикослой подвержены воздействию интерференции, их моделирование производится при помощи соответствующего марковского процесса  $S(t)$ , состояния которого характеризуются набором сессий, обслуживаемых всеми возможными ТД/БС. При этом учитывается как число активных сессий, так и уровень качества канала связи. Пространство состояний рассматриваемой системы представлено на рисунке 2, а вероятность того, что число активных сессий равно  $n$ , может быть вычислена как

$$\pi_n = \pi_0 \frac{\lambda_{m/w/p}^n \prod_{i=1}^n (1 - Q_i)}{\mu^n n!}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{m/w/p}$  – интенсивность поступления новых сессий в слой макро- ( $m$ ), WLAN ( $w$ ) или пико- ( $p$ ), а  $\pi_0$  следует из условий нормировки. Здесь  $Q_{n+1}$  – вероятность блокировки (отказа) сессии при переходе из состояния  $n$  в состояние  $n + 1$ . Например, для пикослоя  $Q_{n+1}$  может быть найдена как

$$Q_{n+1} = 1 - \frac{\Pr \{A_{n+1}, A_n\}}{\Pr \{A_n\}} = 1 - \frac{\Pr \{A_{n+1}\}}{\Pr \{A_n\}}. \quad (2)$$

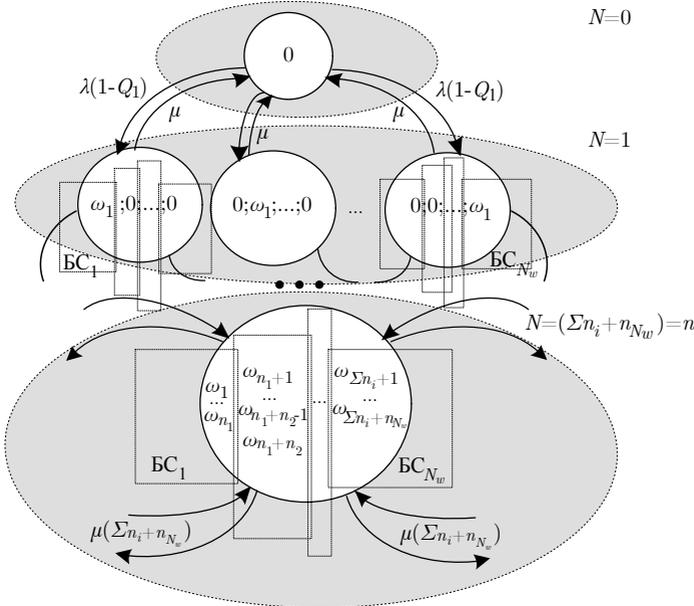


Рисунок 2 — Пространство состояний системы для слоев пико- и WLAN

Событие  $A_n$  представляет собой комбинацию двух факторов для всех активных сессий одновременно: выполнение условия допуска сессии по скорости передачи на ближайшей БС и выполнение условия по уровню интерференции на всех остальных БС. Вероятность  $\Pr \{A_n\}$  вычисляется как

$$\Pr \{A_n\} = [F_{d_1}(d_{r,n})]^n \left[ \Pr \left\{ \gamma_2 \leq \frac{\eta \gamma_1}{\left( e^{\frac{r_0 n_0}{w \delta p}} - 1 \right)} \right\} \right]^n, \quad (3)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – коэффициенты передачи радиоканала до ближайшей и второй ближайшей БС соответственно, а  $F_{d_1}(\cdot)$  – интегральная функция распределения расстояния  $d_1$  от абонентского терминала до ближайшей к нему БС сотовой сети.

При этом величина  $d_{r,n} = \left( \frac{P_{\max} \eta G}{K N_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \left( e^{\frac{r_0 n_0}{w}} - 1 \right)^{-\frac{1}{\kappa}}$  зависит от числа активных сессий на ближайшей БС  $n_0$  и других параметров системы. Данный подход позволяет получить важные характеристики работы системы в стационарном режиме, включая вероятность блокировки сессии и среднее число активных пользователей.

В качестве примера рассматривается сота, радиус которой (согласно рекомендациям ИТУ) составляет 288 м, с переменной интенсивностью поступления новых сессий. Каждая вновь прибывшая сессия имеет случайную длительность, составляющую 3 с в среднем, а также минимальную требуемую скорость передачи данных 500 кбит/с. Доступная полоса пропускания для слоев WLAN, пико- и макро- составляет 20, 10 и 10 МГц соответственно. При этом допустимая мощность передачи абонентского терминала ограничена значением в 23 дБм в слое WLAN и в макрослое, тогда как в пикослое это значение принято 20 дБм. Остальные параметры системы установлены в соответствии со спецификациями 3GPP.

Рисунок 3 иллюстрирует значения вероятности блокировки в рамках рассматриваемой интегрированной сети доступа, а также в каждом из ее слоев по отдельности: макро-, пико- и WLAN. Можно сделать вывод о том, насколько возрастает эффективность работы гетерогенной сети с двумя дополнительными слоями по сравнению с базовой сотовой системой, включающей только лишь макрослой. Особо стоит отметить значительный выигрыш уже для небольшого числа дополнительных модулей инфраструктуры, т.е. четыре ТД WLAN и четыре малые БС в данном примере. В итоге согласованное использование множества сетей доступа позволяет достичь значительного прироста эффективности обслуживания их абонентов.

Далее во второй главе изучается другой тип гетерогенной сети, построенной на совмещенных LTE-WiFi модулях и подразумевающей более тесную интеграцию соответствующих радиотехнологий. Рассматривается ограниченная область, в которой имеется (сверх)плотное размещение таких LTE-WiFi модулей. Проводится сравнительное исследование двух алгоритмов управления трафиком в совмещенной гетерогенной сети доступа:

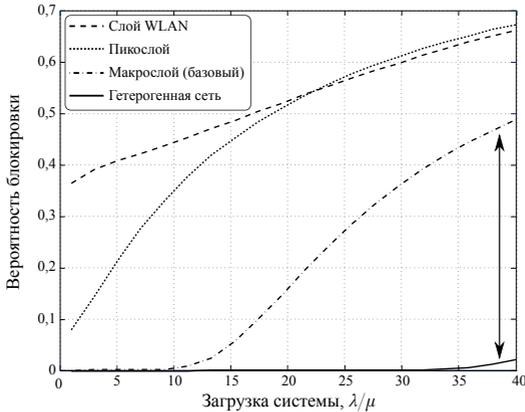


Рисунок 3 — Вероятность блокировки в гетерогенной сети

первый (базовый) связан с выбором одной из технологий радиодоступа для осуществления передачи, тогда как второй (предлагаемый) позволяет вести одновременную передачу по обеим радиотехнологиям.

Рассматриваемая область представляется в виде квадрата со стороной  $D$ . В ней предполагается наличие множества интегрированных малых сот, где каждая совмещенная БС (СБС) оснащена как функционалом LTE, так и функционалом WiFi. Местоположения абонентских терминалов распределены так, что определенная их доля  $\epsilon$  размещена в соответствии с пуассоновским точечным процессом, тогда как остальные пользователи сконцентрированы вокруг обслуживающих их СБС согласно кластерному точечному процессу. Для определенности предполагается, что сессия задает передачу файла, размер которого распределен экспоненциально со средним значением  $\theta$  бит.

Передача в (сверх)плотной сети LTE моделируется согласно описанию на рисунке 4. Для этого определяются интенсивности переходов между состояниями соответствующего марковского процесса путем изучения меченой ячейки Вороного по аналогии с рассуждениями для системы, изображенной на рисунке 2. Учитывается, что все абонентские терминалы, находящиеся внутри зоны покрытия данной СБС, но ассоциированные с другими (соседними) СБС, могут вызывать интерференцию. Они заменяются *виртуальными* пользователями. Предполагается, что их характеристики известны меченой СБС, которая исключает используемые ими радиоресурсы из своего процесса планирования.

Интенсивность переходов  $b_i$  в предыдущее состояние соответствующего марковского процесса связана с размером файла, подготовленного к отправке, и с мгновенной скоростью его передачи. Для равного разделения

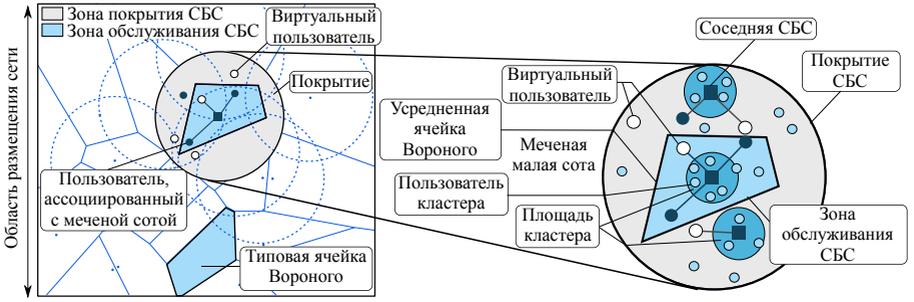


Рисунок 4 — Меченая малая сота LTE с виртуальными пользователями

радиоресурсов между пользователями  $b_i$  может быть найдена как

$$b_i = \tilde{\delta}_w/l \left[ \int_0^{\infty} x \left( \int_{r_R}^{r_{\text{lim}}} \frac{r}{\theta} e^{-\frac{r}{\theta} x} f_r(r) dr - C \frac{r_{\text{lim}}}{\theta} e^{-\frac{r_{\text{lim}}}{\theta} x} \right) dx \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $C = \int_{r_R}^{r_{\text{lim}}} f_r(r) dr$ ,  $\tilde{\delta}_w/l \leq \delta_w/l \leq 1$  – параметр, характеризующий долю доступных радиоресурсов,  $\delta_w$  и  $\delta_l$  – доли радиоресурсов, доступные на данной СБС для обслуживания трафика WiFi и LTE соответственно,  $f_r(r)$ ,  $r \in [r_R, r_{\text{lim}}]$  – функция плотности вероятности для мгновенной скорости передачи данных,  $r_R$  – минимально возможная мгновенная скорость передачи и  $r_{\text{lim}}$  – предельно достижимая скорость передачи.

При этом интенсивность переходов  $a_i$  в следующее состояние процесса определяется средним числом новых терминалов в единицу времени и на единицу площади зоны обслуживания, т.е.  $a_i = \lambda \frac{S_s}{D^2}$ , где  $\lambda$  – интенсивность входного потока сессий в рамках рассматриваемой области  $D^2$ , а  $S_s$  – площадь области, внутрь которой поступают новые сессии, обслуживаемые меченой СБС. Приведенные выше выражения характеризуют стационарное распределение вероятностей и позволяют определить среднее число активных абонентских терминалов (сессий), их среднее время обслуживания и среднюю фактическую скорость передачи данных.

На основании полученных результатов далее сравнивается эффективность работы двух алгоритмов управления трафиком в совмещенной гетерогенной сети LTE-WiFi: предпочтительный выбор технологии WiFi и одновременное использование технологий LTE и WiFi, предполагающее разделение пользовательской сессии между ними. Параметры моделирования для рассматриваемого сценария являются типовыми и соответствуют актуальным рекомендациям 3GPP. Рисунок 5 демонстрирует, что для достаточно высоких значений коэффициента плотности сети  $D_s$  предлагаемый алгоритм управления потоками трафика позволяет достичь более высокой скорости передачи данных.

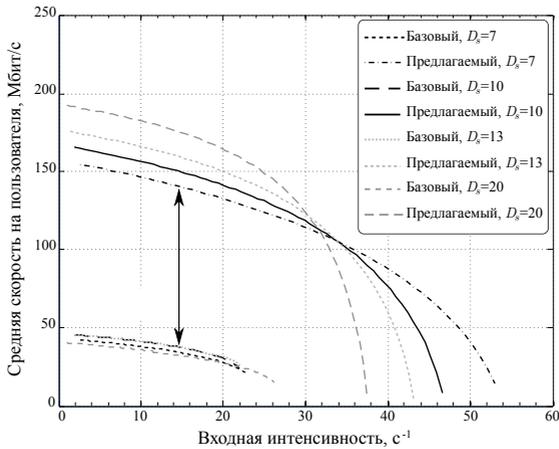


Рисунок 5 — Средняя скорость передачи данных пользователями

В результате разработанная модель гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа, учитывающая обслуживание потоков трафика (сессий) от множества пользователей и высокую плотность размещения узлов сетевой инфраструктуры, позволяет оценивать параметры качества обслуживания, такие как среднее число одновременно передающих пользователей и вероятность блокировки их сессий. Кроме того, предложенный алгоритм с разделением пользовательской сессии применим для управления потоками трафика в гетерогенной сети с двумя совмещенными технологиями радиодоступа, которая характеризуется высокой плотностью размещения узлов сетевой инфраструктуры, и позволяет повысить скорость отправки данных пользователями, а также снизить среднее время их передачи.

**Третья глава** направлена на изучение выгрузки сотового трафика на прямые соединения «устройство – устройство» (Device-to-Device, D2D) между абонентскими терминалами, находящимися в непосредственной близости друг к другу. С учетом поддержки современными мобильными устройствами нескольких технологий радиодоступа (например, LTE и WiFi) рассматривается применение связи D2D в нелицензированном спектре. Предлагается соответствующая модель, учитывающая геометрию размещения узлов сети совместно с динамикой ее трафика во времени. Подобный подход был применен в предыдущей главе для анализа интегрированных гетерогенных систем связи.

Модель предполагает, что передаваемый пользователями трафик соответствует сессиям реального времени с минимальной требуемой скоростью передачи данных  $r$ . Для некоторого передающего терминала  $T_i$  соответствующий принимающий терминал  $R_i$  поступает в систему одновре-

менно с  $T_i$  так, что местоположение  $R_i$  также распределено равномерно. Сотовая БС решает задачи допуска в сеть, управления мощностью и планирования радиоресурсов. При принятии на обслуживание в сотовую сеть передающий терминал занимает долю общего ресурса системы во времени и устанавливает свою излучаемую мощность в соответствии с указаниями БС для достижения требуемой скорости передачи данных.

Общий принцип работы рассматриваемой сети связи пояснен на рисунке 6. Соответственно, для новых сессий, поступающих в систему, предполагается последовательное управление доступом с *сетевым содействием*. Вначале процедура содействия в выборе сети доступа, функционирующая в сотовом слое, предпринимает попытку выгрузки вновь прибывшей сессии на обслуживание в слой D2D. В случае успеха выгруженная в слой D2D сессия обслуживается в нем без прерываний до момента своего окончания и затем покидает систему. В противном случае запускается процедура управления доступом в сотовый слой. В итоге, если некоторая сессия не может быть допущена в сотовый слой, то она считается *окончательно заблокированной* и покидает систему, не получив обслуживания.

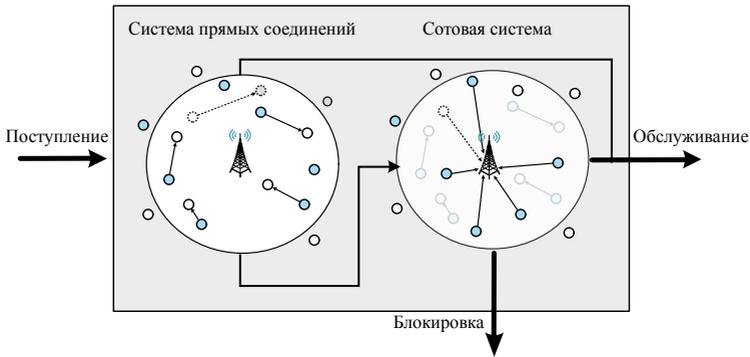


Рисунок 6 — Организация работы системы прямых соединений

Система D2D рассматривается в некоторые моменты времени  $t$ , связанные с поступлением в нее новых сессий (абонентов) и их уходом по завершении обслуживания. Ее поведение описывается при помощи марковского процесса  $S(t)$  по аналогии с подходом во второй главе. Пусть  $Q_{n+1}$  обозначает вероятность события, что вновь поступившей пользовательской сессии отказано в обслуживании системой D2D при условии, что в ней уже имеется  $n$  активных сессий. Стационарное распределение вероятностей может быть вычислено по аналогии с выражением (1). С учетом специфики связи D2D при рассмотрении процедуры управления доступом необходимо, чтобы для всех  $i = \overline{1, n}$  было выполнено следующее условие, связанное

с минимальной требуемой скоростью передачи данных:

$$r \leq w \log \left( 1 + \frac{p_{\max} \gamma_{i,i}}{KN_0} \right) \Leftrightarrow p_{\max} \gamma_{i,i} \geq KN_0 (e^{\frac{r}{w}} - 1). \quad (5)$$

Здесь через  $\gamma_{i,i}$  обозначается коэффициент передачи радиоканала между передающим и принимающим терминалами для сессии  $i$ . Соответственно,  $Q_{n+1}$  вычисляется как

$$Q_{n+1} = \left[ F_\gamma \left( \frac{N_0}{p_{\max}} \right) \right]^{2n-1} \left[ 1 - F_\gamma \left( \frac{\theta_0}{p_{\max}} \right) \right], \quad (6)$$

где  $\theta_0 = KN_0 (e^{\frac{r}{w}} - 1)$  с учетом коэффициента кумулятивной интерференции  $K$  и других параметров системы, а  $F_\gamma(\cdot)$  представляет собой интегральную функцию распределения коэффициента передачи радиоканала.

В итоге сотовая система 3GPP LTE обеспечивает управление D2D-соединениями, использующими радиотехнологию IEEE 802.11 (WiFi-Direct). В качестве примера рассматривается ограниченная область, в которой сотовое покрытие совмещено с зоной обслуживания сети D2D (например, торговый центр или транспортный узел). В частности, изучается работа изолированной круглой соты радиуса 100 м, в рамках которой абоненты обмениваются небольшими фрагментами мультимедиа-данных с минимальной требуемой скоростью передачи 4,8 Мбит/с. Типовая посылка данных от абонента содержит 2 Мбита информации.

Одной из основных характеристик функционирования изучаемой системы является ее емкость, выражаемая в числе сессий, которые могут обслуживаться в ней одновременно. Соответственно, на рисунке 7 данная величина сравнивается для базовой сети LTE и для системы с поддержкой связи D2D, что позволяет сделать вывод о заметных преимуществах при использовании прямых соединений. Здесь непрерывные линии отображают результаты имитационного моделирования (И), тогда как символы соответствуют значениям, полученным при помощи математического анализа (А). Общий характер зависимостей подтверждает рост среднего числа активных сессий.

Далее в третьей главе исследуется перспективная возможность передачи данных на крайне высоких частотах, подверженная блокированию радиосигнала небольшими объектами из-за более коротких длин волн. Ожидается, что сотовая связь 5G New Radio будет работать вначале на частоте около 28 ГГц, а потом и на более высоких частотах. Помимо явных преимуществ, таких как относительно широкая полоса пропускания, эта передовая технология связи на миллиметровых волнах (Millimeter-Wave, mmWave) имеет ряд специфичных особенностей, одной из которых является блокирование mmWave-соединения подвижными объектами. Таким образом, актуален учет динамики процесса блокирования передачи mmWave.

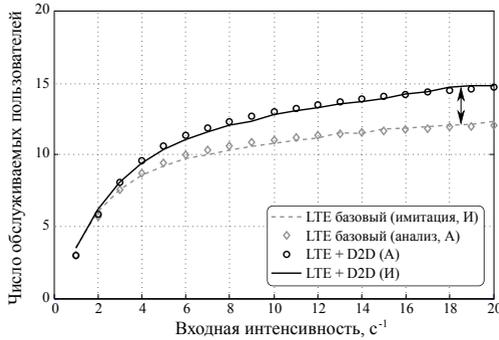


Рисунок 7 — Число обслуживаемых системой пользователей

Центральным звеном предлагаемого подхода является изучение процесса блокирования канала прямой видимости (Line-of-Sight, LoS) при установлении соединения между абонентским терминалом и обслуживающей его БС mmWave. Рассматривается произвольным образом выбранная область  $U_i$  с геометрическим центром  $P_i$ . При этом интенсивность появления новых абонентов составляет  $\lambda_i$ , а интенсивность возникновения блокирующих объектов, называемых здесь *препятствиями*, составляет  $\lambda_{iB}$ .

Графическая иллюстрация блокирования канала прямой видимости между абонентским терминалом, расположенным в точке  $P_i$ , и БС mmWave, размещенной на расстоянии  $r$  от терминала, приведена на рисунке 8. Сигнал LoS, например, от БС mmWave может быть закрыт препятствием (телом человека), которое расположено внутри так называемой *зоны блокирования* LoS. Ее длина составляет  $d = \frac{r(h_P - h_{P,T})}{h_T - h_{P,T}} + w_P/2$ , где  $h_P$  — высота блокирующих объектов,  $h_{P,T}$  — высота абонентского терминала, а  $h_T$  — высота размещения БС mmWave.

Для учета динамики процесса блокирования требуется определить интенсивность появления препятствий  $\lambda_{iT}$ , возникающих в области  $U_i$  с течением времени. При этом можно предположить, что как препятствия, так и абоненты перемещаются внутри  $U_i$  в соответствии с моделью случайного движения на плоскости (Random Direction Mobility, RDM) и имеют постоянную скорость  $V$ . Важно отметить, что для реалистичных расстояний между абонентским терминалом и обслуживающей его БС mmWave площадь зоны блокирования LoS может быть приближенно представлена в виде прямоугольника. Тогда интегральная функция распределения расстояния  $L$ , пройденного препятствием внутри зоны блокирования составит:

$$F_L(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ w_1 F_{L_1^*}(x) + w_2 F_{L_2^*}(x), & 0 < x \leq \sqrt{d^2 + w_P^2}, \\ 1, & x > \sqrt{d^2 + w_P^2}, \end{cases} \quad (7)$$

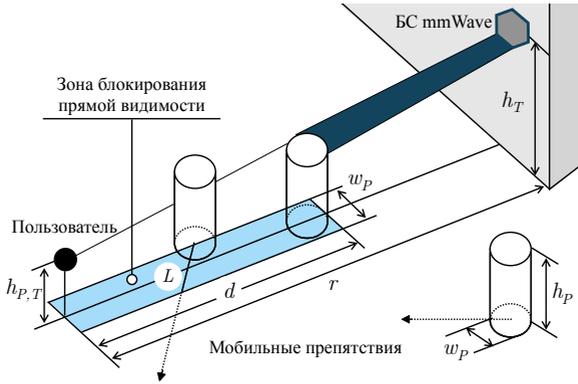


Рисунок 8 — Динамическое блокирование канала прямой видимости

где веса  $w_1$  и  $w_2$  обозначают (1) вероятность события, что препятствие начинает свое движение от стороны с длиной  $d$  и заканчивает его у стороны с длиной  $w_P$  (или наоборот), а также (2) вероятность события, что препятствие начинает свое движение от стороны с длиной  $d$  и заканчивает его у стороны с длиной  $d$  соответственно. В ходе вычисления соответствующих интегральных функций распределения  $F_{L_1^*}(x)$  и  $F_{L_2^*}(x)$  эти вероятности могут быть выражены в виде

$$w_1 = \frac{d^2 + 3dw_P}{d^2 + 3dw_P + 2w_P^2}, \quad w_2 = \frac{2w_P^2}{d^2 + 3dw_P + 2w_P^2}. \quad (8)$$

Для снижения последствий блокирования mmWave-соединения подвижными объектами, а также для поддержания непрерывности сессии предлагается алгоритм с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры mmWave. При его изучении было рассмотрено несколько типов передаваемого трафика на примере потока данных в 50 Мбит/с, соответствующего передаче видеoinформации с разрешением 4К, и в 10 Мбит/с, соответствующего видеозвонку высокого разрешения. Цель алгоритма заключается в управлении одновременным подключением абонентского терминала к двум и более сотам mmWave для оперативного перенаправления активной сессии на соседнюю БС при блокировании текущего соединения.

Изучение вероятности сброса сессии в зависимости от плотности препятствий проводится на рисунке 9. Видно, что ее значение возрастает с увеличением плотности препятствий, когда множество сессий, изначально принятых в условиях LoS, оказываются прерванными вследствие блокирования по мере того как заканчиваются свободные радиоресурсы системы связи mmWave. При этом использование предлагаемого алгоритма с од-

новременным подключением, учитывающего вероятность блокирования и скорость передачи, приводит к существенному снижению вероятности блокировки сессии по сравнению с базовым алгоритмом без перепоключений.

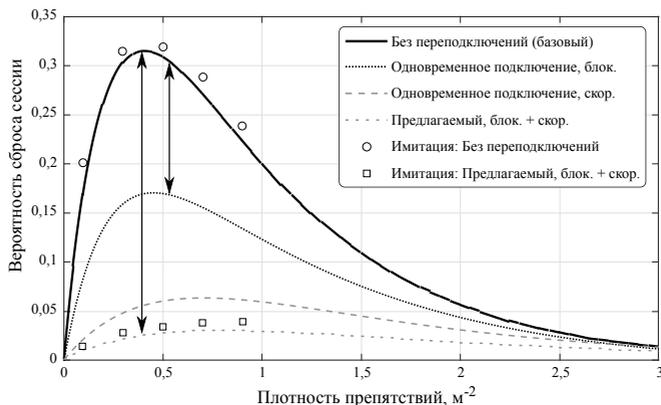


Рисунок 9 — Вероятность сброса сессии из-за блокирования передачи

В результате разработанная модель гетерогенной сети с двумя одновременно функционирующими технологиями радиодоступа и возможностью установления прямых соединений между соседними устройствами при высокой плотности их размещения применима для оценки параметров качества обслуживания, включающих в себя среднее число одновременно передающих пользователей и вероятность блокировки их сессий. Кроме того, сформулированный алгоритм с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры в условиях их плотного размещения, учитывающий блокирование канала прямой видимости препятствиями при передаче на крайне высоких частотах, применим для улучшения параметров качества обслуживания, таких как среднее число одновременно передающих пользователей и вероятность блокировки их сессий.

**Четвертая глава** посвящена изучению использования сотовых систем для организации межмашинного взаимодействия. По сравнению с традиционными способами обмена информацией между людьми организация соединений M2M обладает рядом уникальных особенностей, среди которых следует отметить очень большое число подключенных к сети устройств, относительно малый объем данных при каждой отправке и сравнительно нечастые попытки передачи. Предполагается, что большое число таких устройств стремится установить соединение с сетью практически одновременно, что может вызвать всплеск нагрузки на канал связи.

Вначале рассматривается типовой сценарий, в котором большое число устройств M2M (например, множество сенсоров, счетчиков или измерителей) устанавливает соединение с сетью LTE в течение достаточно короткого интервала времени (см. рисунок 10). Установление начального соединения в сотовых системах связи регулируется методами случайного доступа, и здесь производится моделирование возникающей при этом перегрузки с целью последующего ее предотвращения. Данное исследование проводится на основании соответствующих технических документов комитета 3GPP, в которых заданы параметры рассматриваемого сценария.

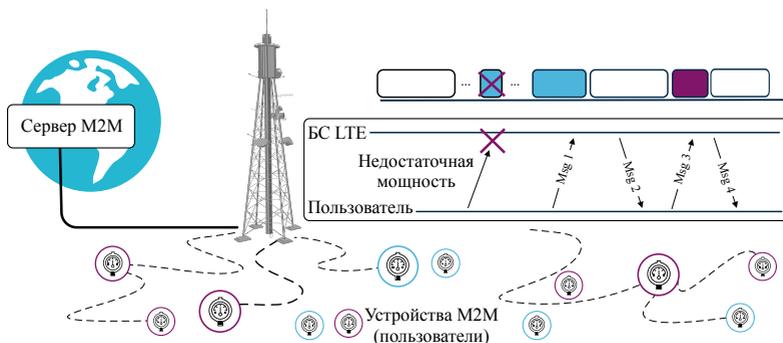


Рисунок 10 — Типовой сценарий M2M с большим числом устройств

Работа канала случайного доступа (Physical Random Access Channel, PRACH) в системе LTE организована в два этапа (см. рисунок 10). На первом из них происходит синхронизация отсчета времени по линии вверх (связанная с обменом управляющими сообщениями Msg 1 и Msg 2), когда при передаче преамбул в режиме случайного доступа используется постепенное повышение мощности для ее подстройки под состояние канала связи. На втором этапе применяется сообщение Msg 3 для отправки служебной информации по линии вверх на БС, а также сообщение Msg 4 для последующего разрешения возможных *коллизий*. Узкое место рассматриваемого протокола, особенно при наличии множества требующих одновременного доступа устройств, связано с ростом вероятности наступления коллизии.

В предлагаемой модели сота LTE содержит  $M$  идентичных M2M-устройств. Каждое из них выбирает подкадр для начала процесса передачи по линии вверх на интервале  $[1; N]$ . После активации устройство M2M считается занятым до момента завершения своей процедуры случайного доступа. В тех подкадрах, где происходит обслуживание (т.е. когда запланирована возможность передачи PRACH), каждое занятое устройство выбирает одну из  $s$  преамбул случайным образом по равномерному

закону и отправляет ее. В соответствии с рекомендациями 3GPP далее предполагается, что коллизия наступает, когда два или более устройства M2M выбирают идентичную преамбулу и передают ее одновременно.

С учетом возможности возникновения коллизий для наибольшего допустимого числа попыток передачи одной преамбулы  $L_1$  среднее число попыток передачи выражается в виде

$$\bar{n}_j = \pi_j^* \sum_{n=1}^{L_1} n \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \pi_j^* \left(1 - \frac{1}{e^i}\right)\right). \quad (9)$$

Здесь  $\pi_j^*$  – вероятность избежания M2M-устройством коллизии в состоянии  $j$  (когда в системе занято ровно  $j$  других устройств), которая составляет

$$\pi_j^* = (1 - \pi_0 s^{-1})^{j-1} (1 - \pi s^{-1})^{M-j}, \quad (10)$$

где  $\pi$  – вероятность, с которой M2M-устройство может инициировать свое начальное соединение с сетью в каждом из  $N$  подкадров, а также предполагается, что  $\pi_0 = 1/(K_0 + K_1 + K + \bar{w})$  зависит от параметров работы протокола множественного доступа.

Основываясь на разработанной модели, рисунок 11 исследует характеристики начального входа в сеть для 30 тысяч устройств M2M относительно вероятности коллизии и вероятности успешного доступа для различных значений индикатора отсрочки PRACH, отвечающего за разрешение коллизий. Приведенные данные получены для типового процесса активации терминалов, как рекомендовано соответствующей документацией 3GPP. Результаты показывают, что вероятность коллизии может быть значительно снижена при использовании значений интервала отсрочки, увеличенных по сравнению со стандартными.



Рисунок 11 — Показатели начального доступа в сотовой системе M2M

Далее в четвертой главе исследуются сети носимых устройств в массовых приложениях, подверженных значительному влиянию интерференции. Предлагается модель, в которой множество персональных сетей соседних пользователей конкурируют за доступ к ограниченным радиоресурсам канала связи (например, в переполненном городском общественном транспорте). Сценарии с высокой плотностью размещения продвинутых носимых устройств могут вскоре стать типовыми в сетях 5G. Например, очки дополненной реальности позволяют пользователям передавать видеоинформацию высокого разрешения, и такое применение требует высокой скорости передачи данных на основе соединений mmWave.

Проводится анализ характеристик mmWave-доступа к беспроводному каналу, учитывающий направленную передачу терминалов, а также плотность и геометрию размещения устройств. Для этого рассматривается множество носимых сетей, каждая из которых именуется здесь персональным набором базовых услуг (Personal Basic Service Set, PBSS). Соответственно, один из терминалов (например, мобильный телефон пользователя) выполняет задачи центрального управляющего узла, координирующего работу остальных устройств PBSS. В частности, он отвечает за составление актуального расписания передач и оповещение о нем всех подключенных к нему терминалов при помощи сообщений-маяков. Данный управляющий узел называется персональной точкой доступа (ПТД).

Предполагается, что к одной ПТД подключено в точности  $M$  активных устройств, имеющих подготовленные к отправке данные. Беспроводной канал связи используется коллективно всеми PBSS, и изучается исключительно передача информации по линии вверх, т.е. от носимых устройств к обслуживающей их ПТД. Кроме того, местоположения узлов моделируются точками на плоскости, и при этом направленная передача каждого из терминалов учитывается в явном виде при помощи определенного азимута (прием подразумевается ненаправленным). Также предполагается, что как ПТД, так и все взаимодействующие с ней  $M$  носимых устройств расположены на теле их пользователя внутри окружности радиуса  $r_0$  (см. рисунок 12).

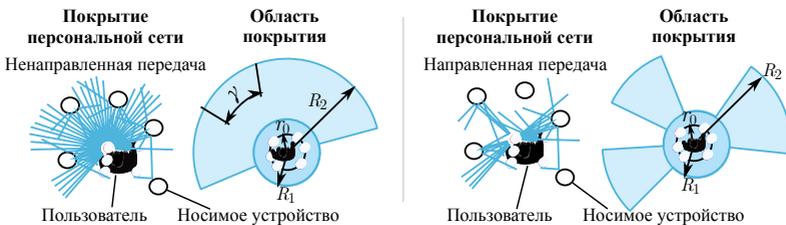


Рисунок 12 — Пример геометрии размещения персональной сети

Целью проводимого моделирования является анализ характеристик работы mmWave-системы носимых устройств, включающей в себя множество интерферирующих между собой персональных сетей PBSS. Они распределены на плоскости так, что не все соседние терминалы имеют возможность принимать сообщения друг от друга ввиду значительных потерь при распространении радиоволны и блокирования направленной передачи телом человека. Особый интерес представляет рассмотрение достаточно высокой плотности размещения ПТД, при которой внутри зоны покрытия каждого терминала функционирует несколько PBSS. Для учета пространственных свойств такой системы дополнительно предполагается, что местоположения ПТД на плоскости подчиняются пуассоновскому точечному процессу интенсивности  $\mu$ .

Для введенной системы случайного доступа вероятность успешно принятого маяка и вероятность успешно принятого фрагмента данных при условии успешной отправки маяка могут быть вычислены как  $P_{B|N} = e^{-\frac{N}{L}}$  и  $P_{D|N,B} = e^{-\frac{N}{L}} e^{-M\frac{N}{L}} e^{-\frac{N}{L}}$ . Тогда нормированная скорость передачи в расчете на один суперкадр сети PBSS определяется как

$$T = \frac{MP_{B|N}P_{D|N,B}}{L} = \frac{M}{L} e^{-2\frac{N}{L}} e^{-M\frac{N}{L}} e^{-\frac{N}{L}}, \quad (11)$$

где  $L$  – число идентичных слотов, составляющих один суперкадр, а  $N$  – число интерферирующих сетей в области покрытия меченой ПТД. Математическое ожидание  $N$  вычисляется исходя из площади покрытия и интегральной функции распределения расстояний между меченой и интерферирующими ПТД.

Предполагается, что соединение между меченой ПТД и любым другим терминалом внутри зоны покрытия (заданной при помощи функции  $\rho$ ) существует тогда и только тогда, когда расстояние между ними составляет  $d < \rho(\Delta\alpha_s)$ , где  $0 \leq \Delta\alpha_s \leq 2\pi$  – относительный азимут устройства. Поскольку рассматривается некоторый меченый терминал, зона его покрытия имеет площадь  $S_c = \int_0^{2\pi} \frac{\rho^2(\alpha)}{2} d\alpha$ , и внутри нее могут возникать интерферирующие устройства. Следовательно, интегральная функция распределения расстояния между меченой ПТД и другими ПТД внутри зоны покрытия может быть записана как

$$F_r(r) = \frac{1}{S_c} \int_0^{2\pi} \frac{\min^2(\rho(\beta), r)}{2} d\beta. \quad (12)$$

Энергетическая эффективность изучаемой системы, измеряемая в бит/Дж и полученная в рамках предложенной модели, представлена на рисунке 13. При этом учитывается характер потребления энергии устрой-

ствами WiGig, построенными по стандарту IEEE 802.11ad/ay и функционирующими на частоте 60 ГГц. Интересно заметить, что энергетическая эффективность резко повышается, когда применяется направленная передача, что связано со снижением числа коллизий. Также важно отметить, что эффективность направленной системы растет при сокращении длительности суперкадра. Однако при этом следует учитывать накладные расходы протокола доступа, которые также зависят от размера кадра, что приводит к появлению его некоторой оптимальной длительности.

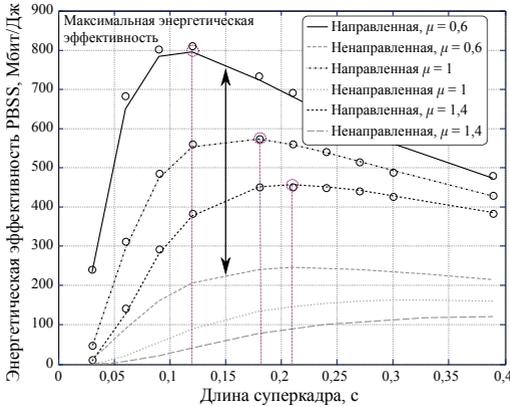


Рисунок 13 — Энергетическая эффективность сети носимых устройств

В результате предложенная модель сотовой сети с конкурентным обслуживанием большого числа пользователей, учитывающая особенности протокола множественного доступа, позволяет изучать показатели эффективности функционирования системы связи, включающие в себя среднее число попыток передачи, а также вероятность успешного установления соединения и задержку доступа в сеть. Кроме того, разработанная модель сети радиодоступа для обслуживания множества плотно размещенных носимых устройств, учитывающая характер потребления ими энергии и особенности протокола конкурентного доступа, применима для оценки показателей эффективности функционирования системы связи и, в частности, энергетической эффективности передачи потокового трафика пользователей.

**Пятая глава** направлена на исследование практических функций управления D2D-взаимодействием в перспективных приложениях 5G. Кроме того, приводятся соответствующие данные имитационного моделирования выгрузки трафика на соединения D2D и результаты работы, полученные в рамках модельной сети 3GPP LTE, управляющей системой WiFi-Direct (WFD). При помощи предложенного протокола управления системой прямых соединений (см. рисунок 14) логическая топология сети может

быть построена по требованию. На этапе регистрации в сети абонентский терминал авторизуется на соответствующем сервере D2D и использует его доменное имя как часть своего профиля при взаимодействии с различными серверами приложений.

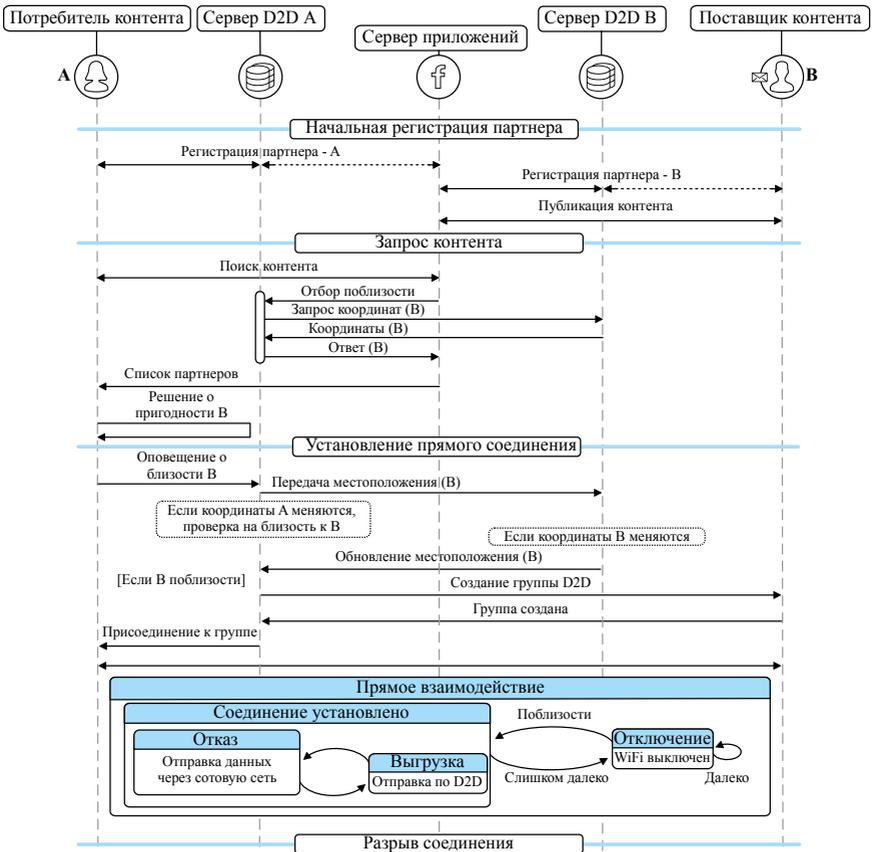


Рисунок 14 — Предлагаемый протокол для реализации связи D2D

При работе системы D2D с сетевым содействием абонентские терминалы приобретают возможность определять, что они находятся в непосредственной близости друг к другу для установления прямого соединения и последующей выгрузки на него своих сессий, минуя сотовую инфраструктуру. Такой режим функционирования, построенный на основе разработанного протокола, позволяет существенно повысить емкость сети, а также увеличить скорость передачи данных терминалом и его энергетическую эффективность. Для иллюстрации возможных выигрышей от использования

технологии WFD с содействием со стороны сети LTE далее рассматривается сценарий, отражающий современные городские условия.

Согласно рекомендациям ITU/3GPP моделируется сотовое покрытие типа «городские малые соты» из 19 шестиугольных сот, в котором расстояние между соседними БС составляет 200 м. Система оперирует двумя полосами частот по 10 МГц, которые являются общими для всех сот, имеющих по три сектора каждая, и работает в режиме частотного дуплексирования (для передачи по линии вверх и вниз соответственно). Абонентские терминалы располагают радиомодулями LTE и WiFi, а также способны использовать технологии радиодоступа LTE и WFD одновременно. Они равномерно распределены внутри зоны покрытия сотовой сети и ассоциированы с БС (по 20 терминалов на сектор).

Результаты имитационного моделирования представлены на рисунке 15 для общей емкости рассматриваемой сети. При этом переданные сессиями LTE и WFD данные суммируются в расчете на соту, связанную с запрашивающим абонентским терминалом. Видно, что выгрузка трафика из системы LTE на соединения WFD существенно повышает скорость передачи. При наличии интерферирующих сторонних устройств (пять терминалов на ТД в среднем) прирост скорости передачи снижается, но остается существенным. Полученные результаты также показывают, что соединения D2D имеют наилучшую производительность, когда доля выгружаемого трафика сравнительно невелика.

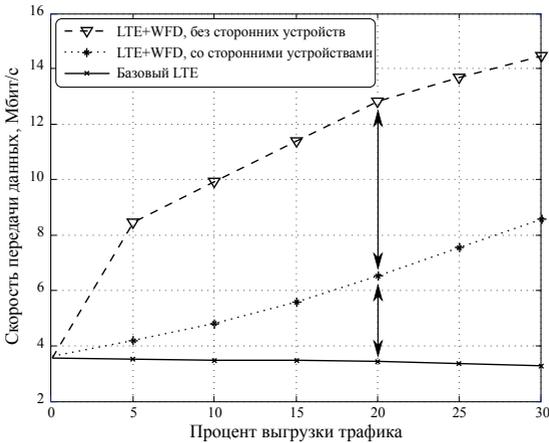


Рисунок 15 — Общая емкость сети в условиях насыщения

Проведенное исследование подтверждает, что имеется существенный потенциал для повышения производительности как сети в целом, так и обслуживаемых ею абонентских терминалов при выгрузке сотового трафика

на соединения WFD в городских условиях работы. Поскольку значительная доля ожидаемого роста мобильного трафика вызвана функционированием социальных приложений и услуг между абонентами, применение предложенного протокола управления выгрузкой позволяет значительно увеличить фактическую емкость сети и качество пользовательского соединения. Для подтверждения этого важного факта на практике был разработан прототип системы D2D с сетевым содействием, а также проведены измерения характеристик его работы в реальных условиях применения.

Далее в пятой главе изучается прямое взаимодействие абонентских терминалов с сетевым кодированием передаваемой ими информации. Применение подходов, связанных с сетевым кодированием, рассматривается для увеличения степени доступности целевого контента на устройствах, взаимодействующих в режиме D2D. Предлагается алгоритм распределения трафика пользователей и подход к его анализу, позволяющий охарактеризовать различные режимы распределения контента, а также сравнить традиционные способы прямого обмена данными с методами, применяющими сетевое кодирование, что позволяет изучать динамику процессов при обмене данными по D2D.

На рисунке 16 показан пример работы системы D2D, включающей соттовую БС и множество обслуживаемых ею абонентских терминалов. Они запрашивают, скачивают и сохраняют в своей внутренней памяти (т.н. кэше) фрагменты закодированных данных, соответствующие различным единицам контента. Такие фрагменты могут быть либо загружены из соттовой сети, либо получены от других пользователей при помощи прямых соединений. Демонстрируется, что использование достаточно простых методов сетевого кодирования позволяет существенно увеличить степень доступности целевого контента на соседних терминалах и, тем самым, повысить долю выгруженного на D2D-соединения трафика.

Исследуется двухслойная гетерогенная сеть, в которой соттовая инфраструктура в лицензированном спектре (например, 3GPP LTE) интегрирована с системой D2D на нелицензированных частотах (например, WiFi-Direct). Абонентские терминалы имеют возможность либо получать свой целевой контент путем его скачивания через соттовую БС, либо устанавливать соединения D2D с расположенными поблизости партнерами для загрузки доступного контента напрямую. Сота имеет радиус  $R$ , и никакие процессы, протекающие за ее пределами, не рассматриваются. Такой сценарий является типовым для моделирования массовых мероприятий, где применение связи D2D будет наиболее полезно в силу повышенной плотности размещения пользователей и относительно высокой степени переиспользования популярного контента.

Новые единицы целевого контента поступают в систему в соответствии с входным процессом интенсивности  $\lambda$  и проводят в ней случайные интервалы времени (называемые *временем жизни* контента) со средней

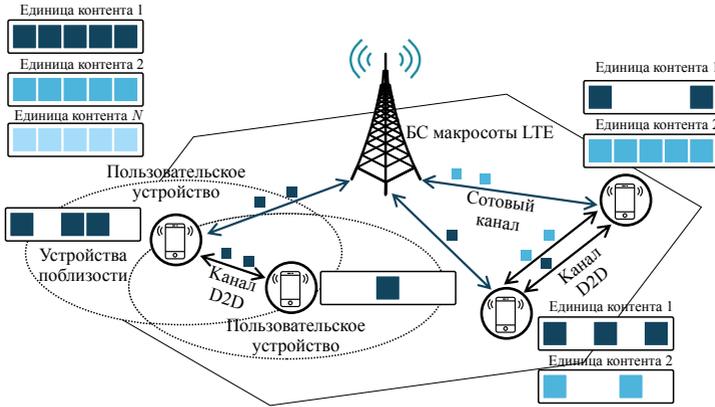


Рисунок 16 — Система выгрузки данных на D2D с сетевым кодированием

длительностью  $\mu^{-1}$  вне зависимости от момента возникновения. В течение всего времени жизни контент считается востребованным и покидает систему (перестает быть востребованным) немедленно по истечении своего времени жизни. Для наглядности предполагается, что все единицы контента имеют одинаковый размер  $Z$ . Для учета структуры рассматриваемых единиц контента используется понятие *фрагмента*, представляющего собой часть единицы контента (например, файла данных).

На основе скорости передачи данных  $\mu_0$ , усредненной по рассматриваемой области, описывается динамика процессов изменения числа пользователей  $x(t)$  и  $y(t)$ , которые заинтересованы в загрузке некоторого целевого контента  $C$ , имеющего время жизни  $T$ . Для таких процессов представляют интерес следующие две фазы: (1) интервал времени, когда единица контента остается востребованной,  $t \in [0; T]$ , и (2) интервал времени, когда она перестает быть востребованной и покидает систему,  $t \in [T; \infty)$ . Первая фаза получает здесь название *фазы роста*, тогда как вторая именуется *фазой сокращения*.

1. Динамика рассматриваемых процессов в течение фазы роста для начальных условий  $x(t_0) = x_0$  и  $y(t_0) = y_0$  сводится к

$$\begin{cases} x = (\tilde{c}_1 + \tilde{c}_2 t) e^{-\theta(t-t_0)} - \frac{\mu_0 \theta + \lambda(\mu - \theta)}{\theta^2}, \\ y = \frac{\lambda \mu + \mu_0 \theta}{\theta^2} - (\eta \tilde{c}_1 + \frac{\tilde{c}_2}{\mu} + \tilde{c}_2 t) e^{-\theta(t-t_0)}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\tilde{c}_1 = x_0 - c_3 + (\mu y_0 + \mu x_0 - \frac{\lambda \mu}{\theta}) t_0$  и  $\tilde{c}_2 = -\mu y_0 - \mu x_0 + \frac{\lambda \mu}{\theta}$ , а параметр  $\theta$  характеризует интенсивность, с которой каждый пользователь может покинуть рассматриваемую систему. Значения  $t_0$ ,  $x_0$  и  $y_0$  восстанавливаются из соответствующих начальных условий.

2. Динамика рассматриваемых процессов в течение фазы сокращения для начальных условий  $x(T) = x_T$  и  $y(T) = y_T$  сводится к

$$\begin{cases} x = (\tilde{x}_T - \mu(\eta\tilde{x}_T + \tilde{y}_T)(t - T))e^{-\theta(t-T)} - \frac{\mu_0}{\theta}, \\ y = (\tilde{y}_T + \mu(\eta\tilde{x}_T + \tilde{y}_T)(t - T))e^{-\theta(t-T)} + \frac{\mu_0}{\theta}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\tilde{x}_T = x_T + \frac{\mu_0}{\theta}$  и  $\tilde{y}_T = y_T - \frac{\mu_0}{\theta}$ , а параметр  $\eta$  характеризует эффективность распределения контента.

В рамках предлагаемого подхода сравниваются различные режимы распределения беспроводного контента. В частности, вводятся в рассмотрение два альтернативных способа, называемых соответственно *базовым* и *кодированным*. Последний предполагает использование случайного линейного сетевого кодирования (Random Linear Network Coding, RLNC). Выбор RLNC в данном исследовании определяется гибкостью этого механизма и достаточно низкой задержкой при его использовании по сравнению с альтернативными кодовыми конструкциями. Эффективность работы гетерогенной системы связи с точки зрения вероятности успешного обслуживания в зависимости от ее загрузки представлена на рисунке 17.

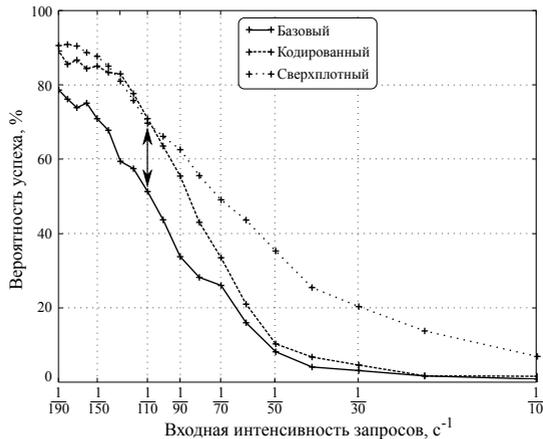


Рисунок 17 — Вероятность успеха для режимов распределения контента

Можно сделать вывод о том, что сравниваемые между собой режимы работы функционируют в схожем диапазоне интенсивностей входного потока, но демонстрируют различное поведение. В частности, использование базового алгоритма приводит к снижению вероятности успеха и росту задержек, тогда как применение алгоритма с сетевым кодированием приближает характеристики производительности к аналогичным для сотовой сети (сверхплотное покрытие: 12 малых БС внутри области, радиус которой составляет 100 м). Можно заключить, что описанный способ выгрузки

трафика на соединения D2D с сетевым кодированием представляет собой оправданную альтернативу сверхплотному сотовому покрытию.

*В результате* предложенный протокол управления системой прямых соединений для гетерогенной сети с интегрированными между собой технологиями радиодоступа, а также способ его реализации в рамках модельной сети с высокой плотностью позволяют снижать нагрузку на сотовую сеть путем выгрузки трафика в сети других технологий радиодоступа, повышая при этом скорость передачи пользователей. Кроме того, сформулированный алгоритм распределения трафика пользователей в гетерогенной системе прямых соединений с большим количеством устройств, основанный на применении методов сетевого кодирования и учитывающий структуру передаваемых сессий, применим для управления нагрузкой с целью снижения времени передачи пользовательских данных и повышения вероятности успешного доступа.

## Заключение

**Основные результаты**, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Разработана модель гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа, применимая для оценки параметров качества обслуживания. Данная модель позволила определить, что вероятность блокировки сессии пользователя может быть снижена до 40% при наличии в рамках гетерогенной сети трех различных технологий радиодоступа.

2. Предложен алгоритм с разделением пользовательской сессии для совмещенной сети радиодоступа в условиях высокой плотности размещения узлов сетевой инфраструктуры, позволяющий повысить скорость отправки данных пользователями на величину 50–60% при входной интенсивности 10–20 сессий в секунду.

3. Разработана модель гетерогенной сети с возможностью установления прямых соединений между пользовательскими устройствами, применимая для оценки параметров качества обслуживания. Данная модель позволила определить, что среднее число передающих пользователей может быть увеличено на 20–25% при входной интенсивности 10–20 сессий в секунду.

4. Сформулирован алгоритм с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры при передаче на крайне высоких частотах, позволяющий понизить вероятность сброса пользовательской сессии от двух до десяти раз по сравнению с базовым алгоритмом без переключений.

5. Предложена модель сотовой сети с конкурентным доступом большого числа одновременно подключающихся устройств, применимая для изучения показателей эффективности системы связи. Данная модель позволила определить, что вероятность коллизии может быть снижена до 50% при использовании интервала отсрочки длительностью от 1 до 3 секунд.

6. Разработана модель сети радиодоступа с конкурентным обслуживанием множества носимых устройств, применяемая для оценки показателей эффективности системы радиодоступа на крайне высоких частотах. Данная модель позволила определить, что энергетическая эффективность персональной сети может быть повышена до трех раз в случае направленной передачи.

7. Предложен протокол управления системой прямых соединений, а также способ его реализации в гетерогенной сети с интегрированными между собой технологиями радиодоступа, позволяющие снизить нагрузку на сотовую сеть, повышая скорость передачи пользователей на 45% и более при выгрузке 20% трафика на прямые соединения.

8. Сформулирован алгоритм распределения трафика с сетевым кодированием, учитывающий структуру сессий, передаваемых в гетерогенной системе прямых соединений с большим количеством пользователей, и позволяющий повысить вероятность их успешного обслуживания до 20% по сравнению с передачей без использования сетевого кодирования.

Таким образом, в результате проведенных в диссертационной работе исследований решена **важная научно-техническая проблема** по созданию моделей и алгоритмов для обеспечения эффективного функционирования гетерогенных беспроводных сетей. В частности, предложены новые модели организации множественного доступа для пользователей гетерогенных сетей мобильной связи в условиях высокой плотности размещения устройств, а также созданы эффективные алгоритмы управления потоками трафика с целью снижения нагрузки на сотовую сеть передачи данных. Методология диссертации впервые объединяет методы теории массового обслуживания и стохастической геометрии, применяя их к современным гетерогенным сетям, и отличается от известных как своим комплексным подходом, так и учетом основных особенностей текущего этапа развития беспроводных систем.

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

### *Главы в монографиях*

1. Андреев, С.Д. Модели и методы анализа и расчета показателей эффективности беспроводных гетерогенных сетей / Ю.В. Гайдамака, Э.С. Сопин, И.А. Гудкова и др. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2018 — 71 с. — 4,44 / 0,74 п.л.
2. Andreev, S. Networking Solutions for Integrated Heterogeneous Wireless Ecosystem / R. Florea, A. Ometov, A. Surak, et al. // In Cloud Computing – Architecture and Applications by InTechOpen. — 2017. — Pp. 103–128. — 1,6 / 0,32 п.л.
3. Andreev, S. Modeling Multi-Radio Coordination and Integration in Converged Heterogeneous Networks / O. Galinina, S. Andreev, A. Pyattaev, et al. // In Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies by John Wiley & Sons, Ltd. — 2016. — Pp. 99–128. — 1,88 / 0,24 п.л.

4. Andreev, S. Design and Performance Analysis of Multi-Radio Small Cell Networks / N. Himayat, S.-p. Yeh, S. Talwar, et al. In Design and Deployment of Small Cell Networks by Cambridge University Press. — 2015. — Pp. 31–57. — 1,69 / 0,28 п.л.
5. Andreev, S. Energy and Delay Performance of Machine-Type Communications (MTC) in Long-Term Evolution-Advanced (LTE-A) / M. Gerasimenko, O. Galinina, S. Andreev, et al. // In Machine-to-Machine (M2M) Communications, Architecture, Performance and Applications by Elsevier. — 2015. — Pp. 315–335. — 1,31 / 0,33 п.л.
6. Andreev, S. Network-Assisted D2D over WiFi Direct / A. Pyattaev, O. Galinina, K. Johnsson, et al. // In Smart Device to Smart Device Communication by Springer. — 2014. — Pp. 165–218. — 3,38 / 0,48 п.л.

*Статьи, опубликованные в журналах из Перечня ВАК РФ*

7. Андреев, С.Д. Управление потоками в гетерогенных мобильных сетях радиодоступа с соединениями устройство — устройство / С.Д. Андреев, К.Е. Самуйлов, А.М. Тюрликов // Вестник РУДН. Серия: Математика. Информатика. Физика. — 2018. — Т. 26, № 4. — С. 357–370. — 0,88 / 0,29 п.л.
8. Андреев, С.Д. Учет специфики доступа большого числа устройств при межмашинном взаимодействии в современных сотовых сетях / О.С. Галинина, С.Д. Андреев, А.М. Тюрликов // Информационно-управляющие системы. — 2018. — № 4. — С. 105–114. — 0,63 / 0,21 п.л.
9. Андреев, С.Д. Пространственно-временной подход к анализу гетерогенных систем связи / С.Д. Андреев, Е.А. Кучерявый, К.Е. Самуйлов // Электросвязь. — 2018. — № 9. — С. 20–26. — 0,44 / 0,15 п.л.
10. Андреев, С.Д. Разработка и исследование системы прямых соединений D2D с сотовой поддержкой LTE / А.В. Пятаев, С.Д. Андреев, Е.А. Кучерявый // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2018. — Т. 11, № 2. — С. 19–34. — 1,0 / 0,33 п.л.
11. Андреев, С.Д. Концепция фантомных пользователей для исследования гетерогенных сетей / Е.А. Кучерявый, С.Д. Андреев // Электросвязь. — 2018. — № 4. — С. 41–47. — 0,44 / 0,22 п.л.
12. Андреев, С.Д. Обеспечение информационной безопасности прямых соединений 5G при изменении скорости движения абонентов и наличии сотового содействия / А.Я. Ометов, С.Д. Андреев, А.Б. Левина и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — Т. 17, № 1. — С. 100–109. — 0,63 / 0,13 п.л.
13. Андреев, С.Д. Анализ характеристик интерференции в модели взаимодействия устройств с учетом среды распространения сигнала / Ю.В. Гайдамака, С.Д. Андреев, Э.С. Солин и др. // Информатика и ее применения. — 2016. — Т. 10, № 4. — С. 2–10. — 0,56 / 0,11 п.л.
14. Андреев, С.Д. Анализ производительности беспроводной системы агрегации данных с состязанием для современных сенсорных сетей / А.Я. Ометов, С.Д. Андреев, А.М. Тюрликов и др. // Информатика и ее применения. — 2016. — Т. 10, № 3. — С. 23–31. — 0,56 / 0,14 п.л.

15. Андреев, С.Д. Подходы к моделированию сетей связи с клиентской ретрансляцией / А.В. Пяттаев, Е.А. Кучерявый, С.Д. Андреев // Системы управления и информационные технологии. — 2013. — Т. 52, № 2. — С. 98–102. — 0,31 / 0,1 п.л.
16. Андреев, С.Д. Управление энергоэффективной доставкой информации на абонентскую станцию / А.В. Анисимов, С.Д. Андреев, А.М. Тюрликов // Электросвязь. — 2011. — № 4. — С. 56–61. — 0,31 / 0,1 п.л.
17. Андреев, С.Д. Оценка производительности простейшей системы абонентской кооперации / С.Д. Андреев, А.В. Винель, О.С. Галинина // Информационно-управляющие системы. — 2010. — Т. 49, № 6. — С. 33–41. — 0,56 / 0,19 п.л.
18. Андреев, С.Д. Анализ алгоритмов распространения тревожного сообщения с глобальным знанием в беспроводных сетях передачи данных с линейной топологией / А.В. Винель, А.Н. Дудин, С.Д. Андреев и др. // Информационно-управляющие системы. — 2010. — № 3. — С. 56–60. — 0,31 / 0,08 п.л.

*Статьи в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science*

19. Andreev, S. Flexible and Reliable UAV-Assisted Backhaul Operation in 5G mmWave Cellular Networks / M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2018. — Vol. 36, no. 11. — Pp. 2486–2496. — 0,69 / 0,24 п.л.
20. Andreev, S. When IoT Keeps People in the Loop: A Path Towards a New Global Utility / V. Petrov, K. Mikhaylov, D. Moltchanov, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2017. — no. 11. — Pp. 2–9. — 0,5 / 0,13 п.л.
21. Andreev, S. Improving Session Continuity with Bandwidth Reservation in mmWave Communications / D. Moltchanov, A. Samuylov, V. Petrov, et al. // IEEE Wireless Communications Letters. — 2018. — no. 7. — Pp. 1–4. — 0,25 / 0,08 п.л.
22. Andreev, S. Analyzing Effects of Directionality and Random Heights in Drone-Based mmWave Communication / R. Kovalchukov, D. Moltchanov, A. Samuylov, et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2018. — Vol. 67, no. 10. — Pp. 10064–10069. — 0,38 / 0,1 п.л.
23. Andreev, S. Upper Bound on Capacity of 5G mmWave Cellular with Multi-Connectivity Capabilities / D. Moltchanov, A. Ometov, S. Andreev, et al. // Electronics Letters. — 2018. — Vol. 54, no. 11. — Pp. 724–726. — 0,19 / 0,1 п.л.
24. Andreev, S. Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities / E. Mokrov, A. Ponomarenko-Timofeev, I. Gudkova, et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2018. — Vol. 67, no. 6. — P. 5505–5509. — 0,31 / 0,08 п.л.
25. Andreev, S. Safe, Secure Executions at the Network Edge: Coordinating Cloud, Edge, and Fog Computing / N. Mäkitalo, A. Ometov, J. Kannisto, et al. // IEEE Software. — 2018. — Vol. 35, no. 1. — Pp. 30–37. — 0,5 / 0,17 п.л.
26. Andreev, S. Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework / E. Markova, I. Gudkova, A. Ometov, et al. // IEEE Access. — 2017. — Vol. 5. — Pp. 22252–22261. — 0,63 / 0,18 п.л.

27. Andreev, S. Modeling Unreliable Operation of mmWave-Based Data Sessions in Mission-Critical PPDR Services / A. Ometov, E. Sopin, I. Gudkova, et al. // *IEEE Access*. — 2017. — Vol. 5. — Pp. 20536–20544. — 0,56 / 0,19 п.л.
28. Andreev, S. On the Temporal Effects of Mobile Blockers in Urban Millimeter-Wave Cellular Scenarios / M. Gapeyenko, A. Samuylov, M. Gerasimenko, et al. // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2017. — Vol. 66, no. 11. — Pp. 10124–10138. — 0,94 / 0,19 п.л.
29. Andreev, S. Leveraging Heterogeneous Device Connectivity in a Converged 5G-IoT Ecosystem / O. Galinina, S. Andreev, M. Komarov, et al. // *Computer Networks*. — 2017. — Vol. 128. — Pp. 123–132. — 0,63 / 0,32 п.л.
30. Andreev, S. Dynamic Multi-Connectivity Performance in Ultra-Dense Urban mmWave Deployments / V. Petrov, D. Solomitckii, A. Samuylov, et al. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. — 2017. — Vol. 35, no. 9. — Pp. 2038–2055. — 1,13 / 0,21 п.л.
31. Andreev, S. Effects of Heterogeneous Mobility on D2D- and Drone-Assisted Mission-Critical MTC in 5G / A. Orsino, A. Ometov, G. Fodor, et al. // *IEEE Communications Magazine*. — 2017. — Vol. 55, no. 2. — Pp. 79–87. — 0,56 / 0,09 п.л.
32. Andreev, S. Characterization of Radio Links at 60 GHz Using Simple Geometrical and Highly Accurate 3-D Models / V. Semkin, D. Solomitckii, R. Naderpour, et al. // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2017. — Vol. 66, no. 6. — Pp. 4647–4656. — 0,63 / 0,21 п.л.
33. Andreev, S. Toward Massive Ray-Based Simulations of mmWave Small Cells on Open Urban Maps / D. Solomitckii, M. Gapeyenko, S. Szyszkowicz, et al. // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. — 2017. — Vol. 16. — Pp. 1435–1438. — 0,25 / 0,08 п.л.
34. Andreev, S. Flexible Dual-Connectivity Spectrum Aggregation for Decoupled Uplink and Downlink Access in 5G Heterogeneous Systems / M. Lema, E. Pardo, O. Galinina, et al. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. — 2016. — Vol. 34, no. 11. — Pp. 2851–2865. — 0,94 / 0,38 п.л.
35. Andreev, S. Characterizing the Impact of Diffuse Scattering in Urban Millimeter-Wave Deployments / D. Solomitckii, Q. Li, T. Balercia, et al. // *IEEE Wireless Communications Letters*. — 2016. — Vol. 5, no. 4. — Pp. 432–435. — 0,25 / 0,07 п.л.
36. Andreev, S. Exploring Synergy between Communications, Caching, and Computing in 5G-Grade Deployments / S. Andreev, O. Galinina, A. Pyattaev, et al. // *IEEE Communications Magazine*. — 2016. — Vol. 54, no. 8. — Pp. 60–69. — 0,63 / 0,18 п.л.
37. Andreev, S. A Novel Security-Centric Framework for D2D Connectivity Based on Spatial and Social Proximity / A. Ometov, A. Orsino, L. Militano, et al. // *Computer Networks*. — 2016. — Vol. 107. — Pp. 327–338. — 0,75 / 0,25 п.л.
38. Andreev, S. Assessing System-Level Energy Efficiency of mmWave-Based Wearable Networks / O. Galinina, A. Pyattaev, K. Johnsson, et al. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. — 2016. — Vol. 34, no. 4. — Pp. 923–937. — 0,94 / 0,31 п.л.
39. Andreev, S. A Unifying Perspective on Proximity-Based Cellular-Assisted Mobile Social Networking / S. Andreev, J. Hosek, T. Olsson, et al. // *IEEE Commu-*

- nications Magazine. — 2016. — Vol. 54, no. 4. — Pp. 108–116. — 0,56 / 0,1 п.л.
40. Andreev, S. Machine-to-Machine Communications over FiWi Enhanced LTE Networks: A Power-Saving Framework and End-to-End Performance / D. Van, B. Rimal, S. Andreev, et al. // Journal of Lightwave Technology. — 2016. — Vol. 34, no. 4. — Pp. 1062–1071. — 0,56 / 0,22 п.л.
  41. Andreev, S. Highly Dynamic Spectrum Management within Licensed Shared Access Regulatory Framework / A. Ponomarenko-Timofeev, A. Pyattaev, S. Andreev, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2016. — Vol. 54, no. 3. — Pp. 100–109. — 0,63 / 0,21 п.л.
  42. Andreev, S. Analyzing Assisted Offloading of Cellular User Sessions onto D2D Links in Unlicensed Bands / S. Andreev, O. Galinina, A. Pyattaev, et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2015. — Vol. 33, no. 1. — Pp. 67–80. — 0,88 / 0,35 п.л.
  43. Andreev, S. Understanding Practical Limitations of Network Coding for Assisted Proximate Communication / A. Pyattaev, O. Galinina, S. Andreev, et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2015. — Vol. 33, no. 2. — Pp. 156–170. — 0,94 / 0,38 п.л.
  44. Andreev, S. 5G Multi-RAT LTE-WiFi Ultra-Dense Small Cells: Performance Dynamics, Architecture, and Trends / O. Galinina, A. Pyattaev, S. Andreev, et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2015. — Vol. 33, no. 6. — Pp. 1224–1240. — 1,06 / 0,42 п.л.
  45. Andreev, S. Understanding the IoT Connectivity Landscape: A Contemporary M2M Radio Technology Roadmap / S. Andreev, O. Galinina, A. Pyattaev, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2015. — Vol. 53, no. 9. — Pp. 32–40. — 0,56 / 0,12 п.л.
  46. Andreev, S. Communication Challenges in High-Density Deployments of Wearable Wireless Devices / A. Pyattaev, K. Johnsson, S. Andreev, et al. // IEEE Wireless Communications. — 2015. — Vol. 22, no. 1. — Pp. 12–18. — 0,5 / 0,25 п.л.
  47. Andreev, S. Capturing Spatial Randomness of Heterogeneous Cellular/WLAN Deployments with Dynamic Traffic / O. Galinina, S. Andreev, M. Gerasimenko, et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2014. — Vol. 32, no. 6. — Pp. 1083–1099. — 1,06 / 0,3 п.л.
  48. Andreev, S. Cellular Traffic Offloading onto Network-Assisted Device-to-Device Connections / S. Andreev, A. Pyattaev, K. Johnsson, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2014. — Vol. 52, no. 4. — Pp. 20–31. — 0,69 / 0,28 п.л.
  49. Andreev, S. Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks / S. Andreev, M. Gerasimenko, O. Galinina, et al. // IEEE Wireless Communications. — 2014. — Vol. 21, no. 6. — Pp. 86–96. — 0,69 / 0,2 п.л.
  50. Andreev, S. Impact of Machine-Type Communications on Energy and Delay Performance of Random Access Channel in LTE-Advanced / M. Gerasimenko, V. Petrov, O. Galinina, et al. // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. — 2013. — Vol. 24, no. 4. — Pp. 366–377. — 0,75 / 0,3 п.л.

## Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве

Личным вкладом автора во все работы, выполненные в соавторстве, являются постановка задач исследований, разработка теоретических моделей и формулировка предложенных алгоритмов, планирование имитационных исследований и экспериментов, обработка данных и интерпретация полученных результатов, обобщение результатов в виде обоснованных выводов и рекомендаций, изложение содержания исследований в форме научных публикаций и апробация результатов.

### В частности, в публикациях

- [1; 3; 9; 16; 34; 47]: автором разработана модель гетерогенной сети с набором интегрированных между собой технологий радиодоступа;
- [2; 4; 11; 18; 44; 49]: автором предложен алгоритм с разделением пользовательской сессии для управления потоками трафика в гетерогенной сети;
- [6; 7; 10; 13; 15; 17; 42]: автором разработана модель гетерогенной сети с возможностью установления прямых соединений между соседними устройствами;
- [19; 21–23; 28; 30]: автором сформулирован алгоритм с одновременным подключением пользователя к нескольким узлам сетевой инфраструктуры;
- [5; 8; 14; 20; 40; 45; 50]: автором предложена модель сотовой сети с конкурентным обслуживанием большого числа пользователей;
- [27; 32; 33; 35; 46]: автором разработана модель сети радиодоступа для обслуживания множества плотно размещенных носимых устройств;
- [12; 24–26; 39; 41; 48]: автором предложен протокол управления системой прямых соединений для гетерогенной сети с интегрированными радиотехнологиями;
- [29; 31; 36–38; 43]: автором сформулирован алгоритм распределения трафика пользователей в гетерогенной системе прямых соединений.

*Андреев Сергей Дмитриевич*

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ТРАФИКА ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_