

На правах рукописи



Бородин Алексей Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ  
СЕТЕЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кучерявый Андрей Евгеньевич**

Официальные оппоненты: **Колбанёв Михаил Олегович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра  
информационных систем, профессор кафедры

**Комаров Михаил Михайлович**,  
кандидат технических наук,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», кафедра инноваций  
и бизнеса в сфере информационных технологий,  
профессор кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Центральный научно-  
исследовательский институт связи», Москва

Защита состоится 03 июля 2019 года в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 219.004.04, созданного при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 31 мая 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 219.004.04,  
канд. техн. наук



М.А. Маколкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность темы диссертации.** Второе десятилетие 21 века ознаменовалось созданием концепции развития сетей связи и разработкой стандартов для сетей связи пятого поколения. Это не только изменило взгляд на развитие сетей связи в целом, но и привело к появлению целого ряда новых направлений в научно-исследовательских работах в области систем, сетей и устройств телекоммуникаций. Вызвано это было, прежде всего, появлением концепций сверхплотных сетей и сетей с ультрамалыми задержками.

В основе появления концепции сверхплотных сетей лежит Интернет Вещей. Действительно, в соответствии с прогнозами известного специалиста в области сетей и систем связи Ж.-Б. Вальднера предельное число интернет вещей составляет 30–50 триллионов. 3GPP уже сегодня рекомендует планировать сети связи пятого поколения исходя из 1 млн устройств на 1 кв.км. Естественно, что это требует пересмотра методов построения сетей связи при внедрении сетей пятого поколения. Последнее возможно только при условии внедрения новых технологий, одной из самых эффективных из которых в условиях внедрения сверхплотных сетей являются технологии взаимодействия устройство-устройство D2D (Device-to-Device). Технологии D2D позволяют как разгрузить ядро сети путем замыкания значительной доли трафика непосредственно между устройствами, так и уменьшить круговую задержку при предоставлении услуг сети. В области технологий D2D существует достаточно большое число работ, в том числе работы по технологии D2D с сетевой поддержкой. Однако планируемое широкое ее распространение ставит вопрос не только о взаимодействиях D2D как таковых, сколько проблему создания D2D сетей. В этом направлении научных исследований пока явно недостаточно, а проблемы маршрутизации в D2D сетях еще не изучены.

Что же касается сетей связи с ультрамалыми задержками, в основе появления которых лежит концепция Тактильного Интернета, то их влияние на методы построения сетей связи имеет еще большее значение. Требование по круговой задержке в 1 мс (в сто раз меньше, чем требования по передаче речи) заставляет задуматься о децентрализации сети и ее ресурсов. Новые технологии программно-коммутируемых сетей SDN (Software Defined Networks), виртуализации сетевых функций NFV (Network Functions Virtualization), мобильных граничных вычислений MEC (Mobile Edge Computing) помогают в ряде случаев достигнуть требуемой величины. Однако проблема стоит гораздо шире, а именно: следует изучить неизбежную кластеризацию сети с учетом источников генерации трафика на различных территориях Российской Федерации и понять не только процессы децентрализации сети, но и предпосылки к децентрализации экономики в целом.

**Степень разработанности темы.** Как уже отмечалось выше, в области Интернета Вещей и сетей связи пятого поколения существует достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых, В.М. Вишневецкого, Б.С. Гольдштейна, В.А. Ефимушкина, В.Г. Карташевского, А.Е. Кучерявого, М.О. Колбанёва, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, М.А. Сиверса, С.Н. Степанова, А.В. Рослякова, А.Е. Рыжкова, В.О. Тихвинского, С.Д. Андреева, Р.В. Киричка, Е.А. Кучерявого, А.С.А. Мутханны, А.А. Ateya, J. Andrews, J. Araniti, M. Dohler, N. Himayat, F. Vaccelli, S. Rangan, T. Rappoport, S. Singh и других.

Отмеченные выше работы внесли решающий вклад в исследования гетерогенных сетей. Были также тщательно изучены проблемы выгрузки трафика и взаимодействий D2D с сетевой поддержкой. Однако проблемам построения сетей связи пятого поколения с учетом предстоящего внедрения сетей с ультрамалыми задержками и децентрализации сети до сих пор не было уделено достаточного внимания. D2D взаимодействия оказались настолько эффективной технологией, что становится целесообразным исследовать D2D сети, построенные на основе этих взаимодействий. Последнее, естественно, требует разработки соответствующих методов маршрутизации в сетях D2D, особенно с учетом свойства сверх плотности сетей связи пятого поколения. Все это вместе взятое и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы.

**Объект и предмет диссертации.** Объектом исследования являются сети связи пятого поколения 5G, а предметом исследования – методы построения этих сетей.

**Цель и задачи диссертации.** Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов построения сетей связи пятого поколения 5G в условиях сверхплотной структуры и ультрамалых задержек.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие задачи:

- анализ концепций развития сетей связи на среднесрочную и долгосрочную до 2030 года перспективы,
- разработка и исследование кластерного построения сетей связи в условиях ультрамалых задержек,
- разработка модели сети связи 2030 года на основе особенностей построения сетей связи с ультрамалыми задержками,
- разработка и исследование метода маршрутизации трафика для сверхплотных сетей на основе технологии взаимодействия устройство-устройство D2D,
- разработка метода построения сети D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов, представляющих собой широко используемые терминалы сетей связи,

– разработка метода выбора местоположения и числа дополнительных маршрутизаторов на основе модифицированного алгоритма FOREL.

**Научная новизна.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

– разработана методика кластеризации сети связи, отличающаяся тем, что кластеризация осуществляется в условиях предоставления услуг сетей с ультрамалыми задержками, что приводит как к децентрализации сети, так и создает предпосылки для децентрализации экономики в целом,

– разработана модель сети связи 2030 года, отличающаяся от известных представлений тем, что в основе построения такой сети лежат сети связи с ультрамалыми задержками,

– предложен метод маршрутизации трафика в сетях связи пятого поколения и алгоритм его реализации при использовании технологий D2D, отличающийся от известных тем, что выбор маршрута осуществляется на основе комплексного критерия максимума пропускной способности и минимума числа транзитов,

– предложен метод построения сети D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов, отличающийся тем, что дополнительные маршрутизаторы представляют собой широко используемые терминалы сетей связи,

– разработана методика выбора местоположения и числа транзитных узлов, отличающаяся от известных тем, что применяется модифицированный алгоритм FOREL, для которого в качестве метрики используется значение величины отношения сигнал/шум плюс помехи SINR.

**Теоретическая и практическая значимость диссертации.** Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в обосновании предстоящей децентрализации сети и экономики в связи с появлением сетей связи с ультрамалыми задержками. Кроме того, разработан метод маршрутизации трафика в сетях связи пятого поколения и алгоритм его реализации при использовании технологий D2D, когда выбор маршрута осуществляется на основе комплексного критерия максимума пропускной способности и минимума числа транзитов. Разработан также метод построения сети D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов, при этом дополнительные маршрутизаторы представляют собой широко используемые терминалы сетей связи, а выбор их местоположения и числа осуществляется на основе модифицированного алгоритма FOREL с использованием в качестве метрики значения SINR.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании научно-обоснованных рекомендаций по планированию сетей связи пятого поколения в условиях внедрения сверхплотных структур и ультрамалых задержек.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ФГУП НИИР при выполнении государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций Администрации связи Российской Федерации в Секторе стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи в работах по разработке стандартов для технологий D2D и Тактильного Интернета, ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования сети связи на базе технологий D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов» и в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Самоорганизующиеся сети» и «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций».

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует следующим пунктам 3, 11, и 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика, теории массового обслуживания, теории оптимизации, имитационного моделирования. Имитационное моделирование выполнялось с помощью пакета Mathcad.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика кластеризации сети связи в условиях предоставления услуг сетей с ультрамалыми задержками, определяющая дальнейшее развитие сетей связи в направлении децентрализации сети.

2. Метод маршрутизации трафика в сетях связи пятого поколения при использовании технологий D2D, при применении которого выбор маршрута осуществляется на основе комплексного критерия максимума пропускной способности и минимума числа транзитов, что дает возможность найти компромисс между длиной маршрута (числом транзитов) и качеством маршрута (пропускной способностью).

3. Метод построения сети D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов, представляющих собой широко используемые терминалы сетей связи, и методика выбора местоположения и числа транзитных узлов на основе модифицированного алгоритма FOREL, для которого в качестве метрики используется значение величины отношения сигнал/шум плюс помехи SINR, что позволяет увеличить пропускную способность сети D2D как минимум на 10–20 %.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования с использованием пакетов Mathcad, обсуждением результатов диссертационной работы на конференциях и

семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях и семинарах: 72-ой Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню Радио (Санкт-Петербург, 2017), 3-й Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Интернет вещей и 5G, INTNITEN (Санкт-Петербург, 2017), Форуме МСЭ для стран СНГ «Интернет вещей, сети связи и большие данные, как инфраструктурная основа Цифровой экономики» (Санкт-Петербург, 2018), Семинаре МСЭ для стран СНГ «Интернет вещей и будущие сети связи» (Санкт-Петербург, 2018), 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT (Санкт-Петербург, 2018), Форуме МСЭ «Умные устойчивые города: технологические тренды, истории успеха и перспективы» (Беларусь, г. Минск, 2019), на семинарах кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них: 6 статей в рецензируемых научных журналах; 1 статья в изданиях, индексируемых в международных базах данных; 4 в других изданиях и материалах научных конференций.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа изложена на 124 страницах общего текста и включает введение, 4 главы, заключение, приложение и список литературы, состоящих из 104 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, рассмотрены теоретическая и практическая ценность исследования, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях и семинарах, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ существующих концепций развития сетей связи и новых технологий, на основе которых эти концепции можно реализовать. Основные отличия сетей связи пятого поколения от существующих заключаются в том, что они являются сверхплотными сетями с ультра малыми задержками, а это требует разработки новых методов их построения. Для реализации требований по сверх плотности и ультра малым задержкам требуется

применение новых технологий, таких как программно-конфигурируемые сети SDN, виртуализация сетевых функций NFV, мобильные граничные вычисления MEC, взаимодействия устройство-устройство D2D.

Помимо изменения собственно методов построения сетей связи пятого поколения, требуются изменения методов идентификации, тестирования и иных, сопутствующих обеспечению устойчивого функционирования этих сетей. В первой главе диссертационной работы предложено для идентификации в сверхплотных сетях использовать технологию идентификации на основе архитектуры цифровых объектов DOA (Digital Object Architecture). Для исследований, тестирования и верификации сетей и систем связи пятого поколения в диссертационной работе предложена новая структура модельной сети, реализованная на кафедре сетей связи и передачи данных СПбГУТ, используемая для исследований характеристик Тактильного Интернета и Интернета Навыков.

**Вторая глава диссертации** посвящена сетям связи пятого поколения как основе цифровой экономики и перспективам развития сетей связи до 2030 года. Отмечается, что решающую роль в преобразовании сетей на этапе разработки и создания сетей связи пятого поколения играют концепция Тактильного Интернета и требования по ультра малым задержкам. Мало того, сети связи с ультра малыми задержками в настоящее время являются основой для разработки концепции сетей связи 2030 года.

С каждым годом все возрастает доля информационно-коммуникационных технологий во внутреннем валовом продукте, т.е. растет влияние сети на развитие общества. Во втором десятилетии 21 века эта тенденция приобрела новые черты, связанные с тем, что появилась так называемая конвергенция отраслей. Действительно, именно сеть связи общего пользования выступает как надстройка над всеми другими отраслями, обеспечивая необходимую инфраструктуру для создания и функционирования медицинских сетей, сетей для жилищно-коммунального хозяйства, автомобильных сетей и т.п. При этом, исходя из экономических соображений, на этапе развития сетей связи следующего поколения зачастую принимались решения по централизации ключевых элементов сети, например, IMS (IP Multimedia Subsystems). Такие решения, естественно, вступали в противоречие, например, с обеспечением надежностных характеристик сети, но самое главное – способствовали трансферу интеллектуальных ресурсов сети из районных центров и относительно небольших городов в крупные и очень крупные населенные пункты.

Тактильный Интернет и децентрализация сети могут принципиально изменить данную ситуацию, поскольку оказание услуг Тактильного Интернета с необходимым качеством возможно в круге радиусом не более 50 км. Учитывая, что услуги Тактильного Интернета будут, скорее всего, определяющими для сетевых роботов, децентрализация сети приведет не только к перераспределению



высококвалифицированных специалистов в области связи, но и в области промышленного производства, современной медицины и т.д.

На рисунке 1 изображена карта Ленинградской области и выделенные группы (кластеры) для обслуживания трафика с учетом целевого значения задержки, не превышающего 1 мс.

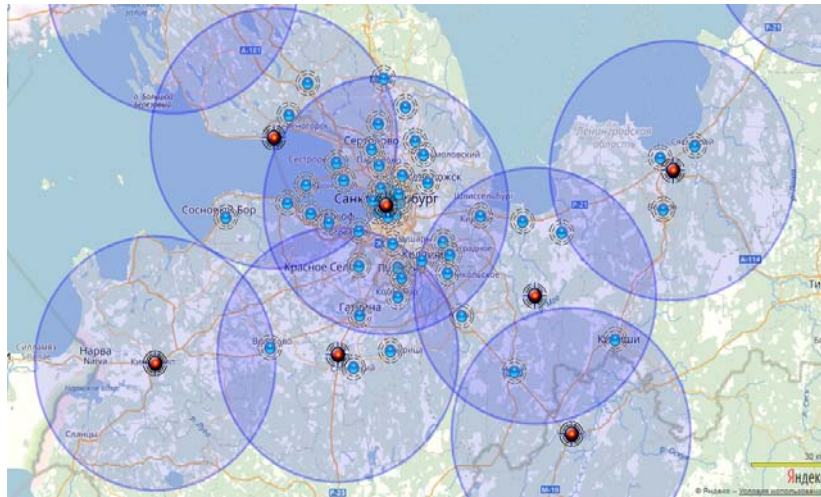


Рисунок 1 – Кластеризация сети Ленинградской области

Достижение такой величины задержки сопряжено с повышением пропускных способностей линий сети связи. Однако возможности снижения задержки ограничены физической природой среды распространения сигналов, скорость распространения которых ограничена скоростью света. Радиус кластеров, приведенных на рисунках, составляет 50км. Точки генерации трафика обозначены синим цветом. На рисунках эти точки отображены в соответствии с масштабом карты. Центры кластеров, в которых должны размещаться облака операторских компаний, обозначены красным цветом. Размещение кластеров близко к оптимальному и получено с помощью метода кластеризации FOREL.

Отметим, что данная задача может решаться как в линейном, так и в метрическом пространстве. В первом случае центр кластера может быть получен в любой точке рассматриваемой области, во втором случае центр кластера всегда будет совпадать с координатами одного из кластеризуемых объектов, т.е. с координатами некоторого населенного пункта. Таким образом, дальнейшее развитие сетей связи и реализация услуг Тактильного интернета при внедрении сетей связи пятого поколения приводит к децентрализации сети на основе требований по обеспечению задержки величиной не более 1 мс.

Еще не до конца завершены работы по стандартизации сетей связи пятого поколения 5G/IMT-2020, а в Секторе Стандартизации Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) создана специальная группа по исследованию и последующей стандартизации сетей связи 2030, которая должна

определить основные характеристики и направления стандартизации таких сетей. Это могло бы казаться преждевременным, если не принять во внимание, что до 2030 года осталось всего 11 лет с небольшим.

Многие характеристики сетей связи 2030 будут определяться новыми технологиями, которые найдут широкое внедрение для реализации этих сетей. Искусственный интеллект будет управлять потоками трафика, квантовые компьютеры позволят терминалам пользователя выполнять множество новых задач при взаимодействиях с близко находящимися пользователями, роботами, устройствами, нанотехнологии предоставят беспрецедентные услуги для пользователей медицинских сетей и т.д. Но с точки зрения сетей связи как таковых сети связи 2030 будут сверхплотными с ультрамалыми задержками (рис. 2), персонализированными для реализации телеприсутствия, с интеграцией наземного и летающего сегмента, функционирующего на малых высотах, взаимодействующими с наномиром, а также в полной мере реализовавшими концепцию Индустрии 4.0 и предоставляющими услуги сети роботам-гуманоидам на производстве.

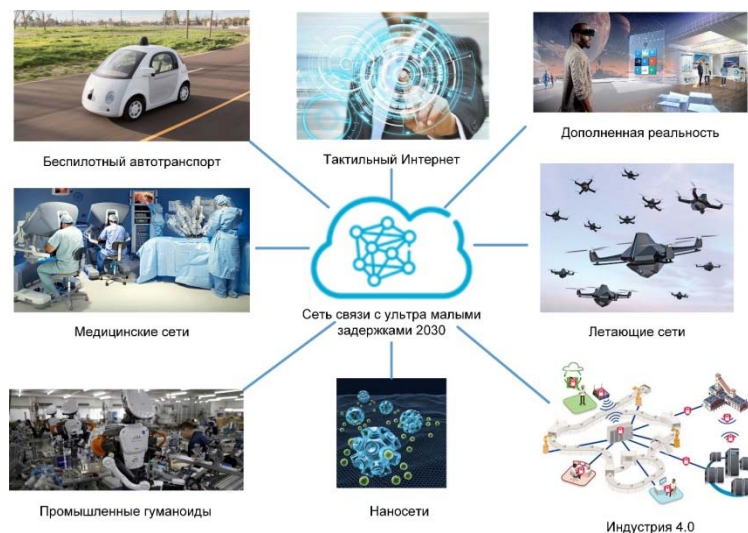


Рисунок 2 – Модель сети связи 2030 с ультра малыми задержками

**В третьей и четвертых главах** диссертационной работы исследуются возможности применения для построения сетей связи пятого поколения технологий устройство-устройство D2D. Сверхплотные сети требуют развития этой технологии, позволяющей в ряде случаев для оказания услуг использовать ресурсы сети только на уровне терминалов и/или базовых станций. Проводя аналогию с построением ТфОП, когда внутривыделенная нагрузка составляла в крупных городах 16 %, можно предположить, что с использованием D2D-технологий в сетях 5G будет обслуживаться большая доля трафика пользователей.

**В третьей главе** разработан и исследован метод маршрутизации трафика в сверхплотных сетях на основе использования технологии D2D. Поскольку

исследуемые сети связи пятого поколения являются сверхплотными, проявляется существенное влияние трафика на величину помех на различных участках сети, что требует учета этого явления и оценки его численных характеристик.

С помощью имитационной модели была исследована зависимость мощности помехи в точке приема от плотности устройств при различной интенсивности использования канала (разном трафике). На рисунке 3 представлена полученная в результате моделирования зависимость при среднем использовании канала 0,01, 0,1 и 0,5 и изменении плотности устройств от 0,0005 до 0,02 устройств/м<sup>2</sup>. При моделировании мощности всех источников считаются одинаковыми и равными 20 дБм, все источники случайным образом размещены в прямоугольной области площадью 40 000 м<sup>2</sup>.

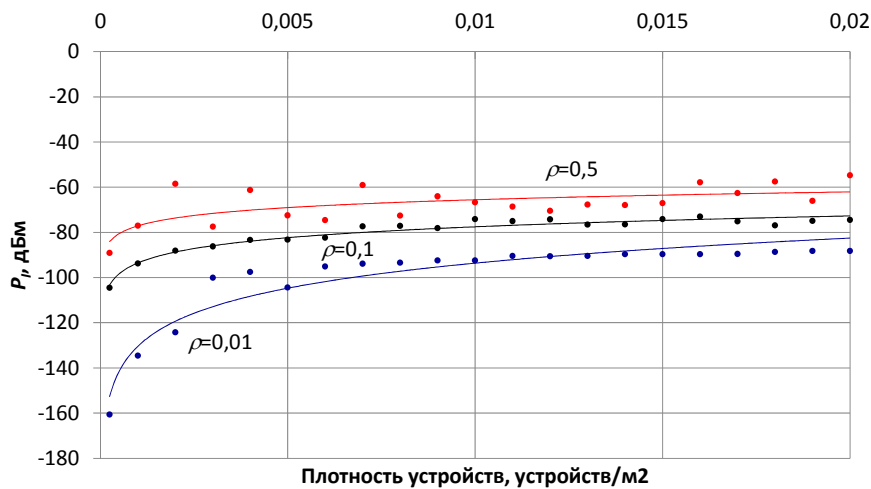


Рисунок 3 – Зависимость мощности сигнала помехи в точке приема от плотности устройств при различном использовании канала

Аппроксимация результатов моделирования позволила получить простую эмпирическую функцию, позволяющую установить зависимость мощности помехи от плотности терминалов и интенсивности трафика:

$$P_l = \frac{3,8}{\rho^{0,3}} \lg(d) - 6,8 \lg(\rho) - 53,1 \text{ (дБм)}, \quad (1)$$

где  $d$  – плотность терминалов/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – интенсивность использования канала.

Далее рассмотрим модель сети в виде графа с заданным множеством вершин  $V$  и дуг  $A$   $G(V, A)$ , в котором вершины соответствуют узлам сети, а дуги связям между ними. Связи между вершинами характеризуют свойства каналов, которые в общем случае, не симметричны. Если граф связный, то между любой парой вершин  $s$  и  $t$  может существовать один или более путей, в общем случае множество путей  $P_{st}$ . Каждый путь в графе (маршрут в сети связи)  $P$  между вершинами  $s$  и  $t$  содержит некоторое число участков  $k$ , каждый из участков описывается соответствующей дугой  $P_{st} = \{a_{si}, a_{ij}, \dots, a_{m,k}\}$ . Каждой из дуг  $a_{ij}$  сопоставлено численное значение, отражающее его пропускную способность. В частности, можно полагать  $a_{ij} = b_{ij}$ .

Таким образом, задачу выбора маршрута в данном случае можно сформулировать как задачу оптимизации, которая заключается в выборе маршрута с максимальной пропускной способностью, которая определяется участком с минимальной пропускной способностью, т.е.

$$\mathbf{P}_{ij}^{(\max)} = \max_{\mathbf{P}_{ij} \in \Pi_{ij}} \left\{ \min(a \in \mathbf{P}_{ij}) \right\}. \quad (2)$$

Выбор маршрута с максимальной пропускной способностью по критерию максимума минимального ее значения для всех участков маршрута эквивалентен выбору маршрута по критерию максимума минимального значения  $SINR$  для всех участков маршрута. Тогда в качестве критерия выбора будем использовать следующий:

$$SINR_{ij} = \max \left\{ SINR_{ij}, \min(SINR_{ik}, SINR_{kj}) \right\}. \quad (3)$$

Для исследования маршрутов была построена имитационная модель, описывающая маршрутизацию в сети, размещенной в двумерном пространстве в зоне обслуживания, представляющей квадрат со стороной 200 м. В зоне обслуживания узлы сети размещены случайным образом, т.е. координаты  $x$  и  $y$  узлов сети представляют собой независимые случайные числа с равномерным законом распределения. Полагаем, что каждый из узлов сети может быть связан с каждым узлом. При исследовании выбираются случайные пары узлов и строятся маршруты между ними.

На рисунке 4 приведены результаты имитационного моделирования выбора маршрута между двумя узлами сети согласно критерию минимального расстояния (рис. 4.а) и максимума пропускной способности, с учетом помехи (рис. 4.б).

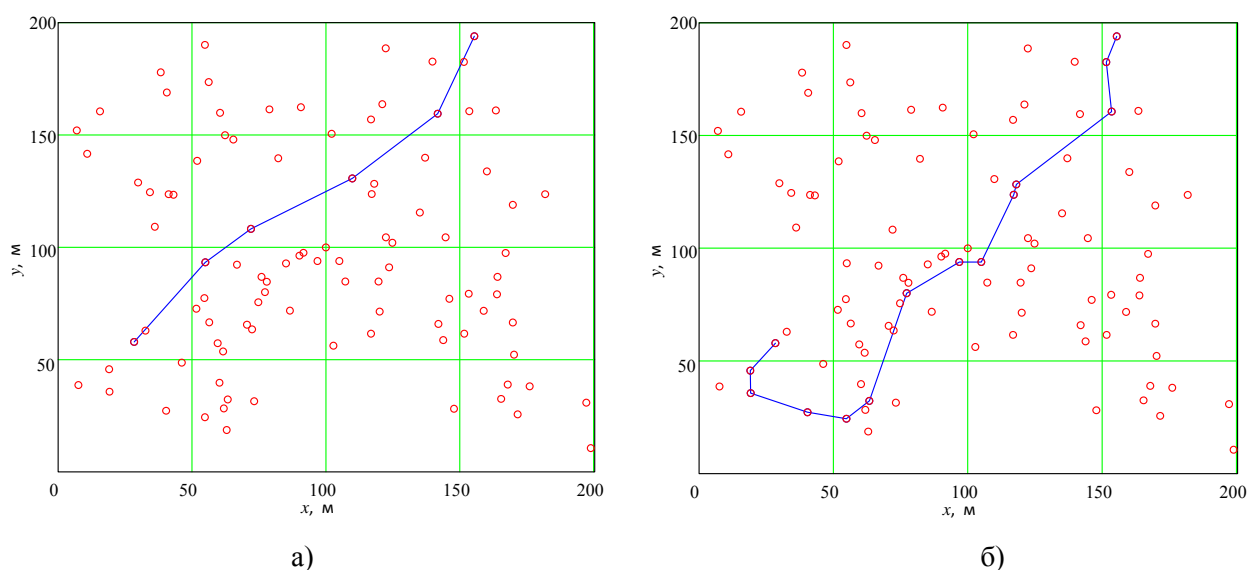


Рисунок 4 – Примеры выбора маршрутов по критериям длины (расстояния) (а) и максимума пропускной способности (б)

Как видим, протяженность маршрута, построенного по второму критерию существенно больше (в первом случае 4 транзитных узла, во втором 12 транзитных узлов).

Из приведенных примеров видно, что принятие в расчет помех, производимых сигналами узлов сети, существенно влияет на выбор маршрута. Анализ результатов имитационного моделирования показал, что по сравнению с маршрутом, выбранным по критерию расстояния (кратчайшим в смысле расстояния), в среднем увеличивается количество транзитов (скачков). Это объясняется выбором участков с максимальным отношением  $SINR$ , величина которого обратно пропорциональна расстоянию между передающими и приемными узлами. Увеличение количества транзитов, в общем, является фактором, отрицательно влияющим на качество маршрута, поэтому его целесообразно учитывать при поиске решения. Рассмотрим комплексный критерий выбора маршрута по максимуму пропускной способности и минимуму количества транзитов

Так как одновременное применение двух критериев на каждом шаге процедуры поиска маршрута невозможно сформулируем условие для предпочтения одного из них.

Вероятно, можно предположить, что строгое применение критерия (3) не всегда оправдано. Например, если разница между  $SINR_{ij}$  и  $\min(SINR_{ik}, SINR_{kj})$  мала, то выбор дополнительного транзита через  $k$ -й узел не оправдан:

$$SINR_{ij} = \begin{cases} \max\{SINR_{ij}, \min(SINR_{ik}, SINR_{kj})\}, & |SINR_{ij} - \min(SINR_{ik}, SINR_{kj})| > \varepsilon_0 \\ SINR_{ij} & \end{cases} \quad (4)$$

При этом необходимо оценить «критическое» значение  $\varepsilon_0$ , превышение которого делает оправданным увеличение числа транзитов. Для выбора этой величины будем исходить из следующих рассуждений. Увеличение числа транзитных узлов в маршруте увеличивает трафик, производимый в сети (использование среды распространения), следовательно, и мощность помехи для других узлов сети, уменьшая тем самым для них отношение  $SINR$ . Будем полагать, что решение о выборе дополнительного транзитного узла целесообразно лишь тогда, когда выигрыш, выражаемый через  $\varepsilon_0$  в (4) превышает снижение величины  $SINR$  для остальных узлов.

На рисунке 5 приведены результаты исследования с помощью имитационного моделирования зависимости относительной величины трафика, обслуживаемого узлом от величины выигрыша  $\varepsilon_0$  (4).

Из результатов, приведенных на рисунке 5 видно, что с увеличением величины  $\varepsilon_0$  относительная величина трафика, обслуживаемого узлом уменьшается. Это связано с уменьшением длины маршрута.

Предложенный метод позволяет получить компромиссное решение, учитывающее как качество выбираемого маршрута, так и степень влияния этого решения на качество функционирования сети.

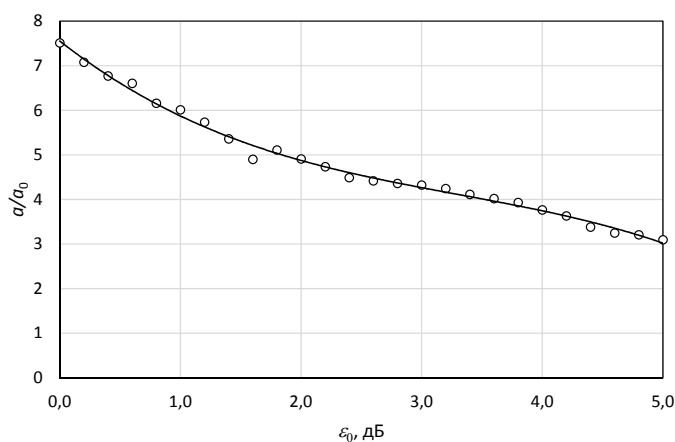


Рисунок 5 – Зависимость относительной величины нагрузки на узел сети от величины выигрыша  $\epsilon_0$

**В четвертой главе** диссертации разработан метод построения сети связи пятого поколения с использованием технологий D2D и дополнительных маршрутизаторов.

Будем полагать, что в некоторой зоне обслуживания, представляющей двумерную область, размещены  $n_T$  терминалов пользователей, которые могут быть узлами сети. В этой же области может быть размещено  $n_M$  дополнительных узлов – маршрутизаторов. Общее количество узлов в зоне обслуживания  $n = n_T + n_M$ , а доля маршрутизаторов составляет  $\eta = n_M/n$ .

В задаче будем учитывать такие факторы как расстояния между узлами  $d_{ij}$ , мощности передаваемых сигналов  $P_i$ , затухание сигнала  $A_{ij}$ , производимый трафик  $a_i$ . Будем полагать, что передавая сигналы, узлы создают помехи другим узлам сети, которые влияют на качество приема, характеризуемое отношением сигнал/(шум плюс помеха)  $SINR$ . Если мощность помехи на входе приемника больше некоторой величины, то канал можно считать занятым, в противном случае, помеха влияет на качество канала через величину  $SINR$ , что выражается в уменьшении скорости передачи данных.

Полагаем, что узлы сети размещены в зоне обслуживания случайным образом, т.е. образуют пуассоновское поле. Координаты узлов  $(x_i, y_i)$  представляют собой независимые случайные числа, имеющие равномерное распределение.

Выбор местоположения транзитного узла можно рассматривать как задачу выбора множества узлов (для которых он будет транзитным) по некоторому критерию. В качестве такого критерия целесообразно использовать величину  $SINR$ . Критерием отбора узлов в группу узлов может быть условие:

$$SINR(x, y, i) \geq S_0 \quad (5)$$

Пусть в целевой области имеется множество из  $n$  узлов (терминалов пользователей)  $\mathbf{N} = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ , тогда введение  $k$  транзитных узлов будем рассматривать как разбиение этого множества на  $k$  подмножеств  $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \dots, \mathbf{N}_k$ , таких что  $\bigcup_{i=1}^k \mathbf{N}_i = \mathbf{N}$ ,  $\bigcap_{i=1}^k \mathbf{N}_i = \emptyset$ . Для решения подобных задач могут быть использованы методы кластерного анализа.

Воспользуемся снова методом формального элемента FOREL В результате применения этого метода получаем разбиение исходного множества объектов  $\mathbf{N}$  на некоторое (случайное) количество подмножеств  $\mathbf{N}_k$ , которое можно рассматривать как близкое к оптимальному решение задачи. Изменяя начальные условия, которые состоят в выборе начальной точки поиска можно получить различные решения. Эта возможность может быть использована на практике для получения множества решений, дальнейшего их анализа и выбора наиболее приемлемого по некоторым дополнительным критериям, например, количеству элементов в кластерах, распределению их количества и др.

На рисунке 6 приведены примеры решения задачи выбора местоположения для транзитных узлов при различной величине  $S_0$ . В модели зона обслуживания принята как квадрат размера  $500 \times 500$  м. В зоне обслуживания случайным образом размещены 100 узлов сети. В данном случае использовано мультимодальное распределение с четырьмя локальными точками рассеяния. Найденные решения отмечены перечеркнутыми кружками, а узлы сети точками.

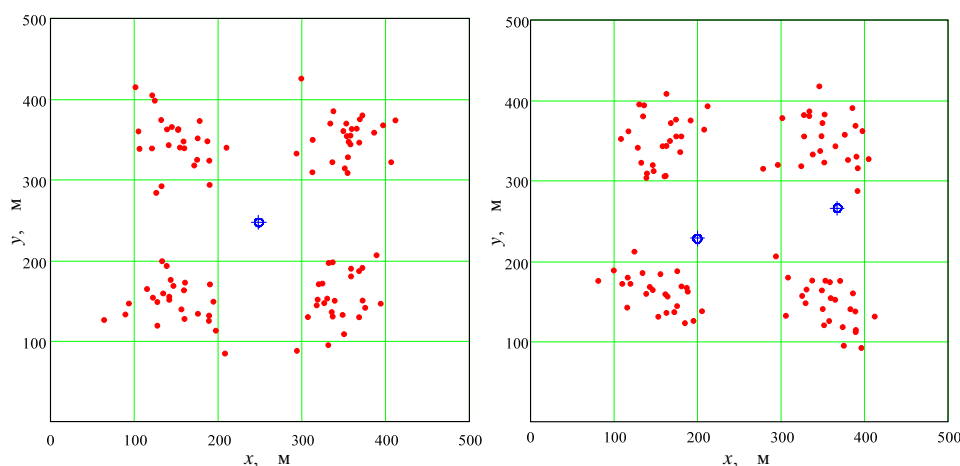


Рисунок 6 – Кластеризация для различных пороговых значений  $SINR$  (5 дБ и 7 дБ)

На рисунке 7 приведены гистограммы эмпирических распределений  $SINR$  полученных в результате кластеризации с пороговой величиной 8дБ предложенным методом (рис. 7.а) и кластеризацией по величине  $RSSI$  (без учета помех – рис. 7.б).

Полученное распределение (рис. 7.а) ограничено снизу величиной порогового значения, а сверху величиной максимально достижимого значения, которое

определяется параметрами и конфигурацией сети (в данном случае 28 дБ). Средняя величина составила 13,70 дБ, а среднеквадратическое отклонение 4,30 дБ. Распределение, полученное в результате кластеризации по величине  $RSSI$ , имеет аналогичный характер, с той разницей, что нижняя его граница определяется параметрами сети, как и верхняя. Средняя величина  $SINR$  во втором случае составляет 11,75 дБ, среднеквадратическое отклонение 5,8 дБ.

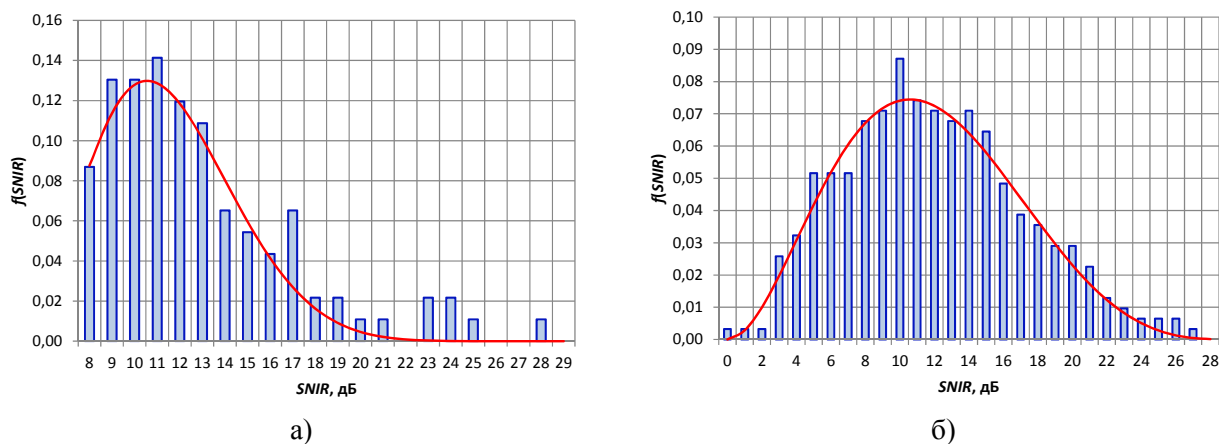


Рисунок 7 – Распределение величины  $SINR$  для узлов сети при пороговом значении 8 дБ (а), аналогичное распределение при кластеризации по  $RSSI$  (б)

В данном случае выигрыш, который дает предлагаемый алгоритм, составляет около 2 дБ для среднего значения и 1,5 дБ для среднеквадратического отклонения. Таким образом, решение, полученное предложенным методом, позволяет получить большую пропускную способность (в среднем на 5 Мбит/с для стандарта 802.11n) и меньший ее разброс для узлов сети по сравнению с методом, не учитывающим влияния помех. Также заметим, что при кластеризации без учета помех реальное отношение  $SINR$  в ряде случаев составляет менее 2 дБ, что практически соответствует нулевой пропускной способности, т.е. отсутствию связи.

Если эффективность введения транзитных узлов представлять такими параметрами как отношение сигнал/(шум+помеха) при учете внутриканальных помех, а также величиной пропускной способности, то можно утверждать, что предлагаемый метод имеет существенно большую эффективность по сравнению с подобными методами, не учитывающими внутриканальных помех.

Сравнительной оценкой эффективности может быть величина  $SINR$  при равном количестве транзитных узлов. Для сравнения эффективности данного метода рассмотрим модель с равномерным распределением узлов в зоне обслуживания и оценим зависимость средней величины  $SINR$  для различного количества транзитных узлов, выбранных с учетом и без учета интерференции. На рисунке 8 приведены полученные зависимости.



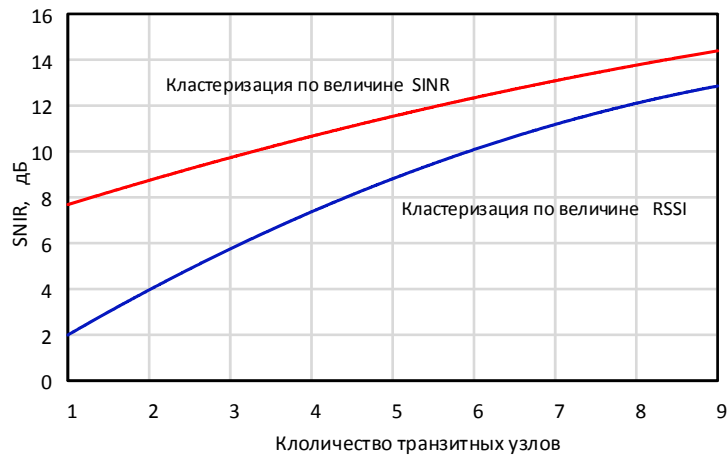


Рисунок 8 – Зависимость средней величины  $SINR$  от количества транзитных узлов (равномерное распределение узлов)

Как видно из полученных зависимостей, эффективность предложенного метода выше, чем при кластеризации без учета помех, причем больший выигрыш имеет место при относительно малом количестве транзитных узлов. С ростом количества транзитных узлов выигрыш снижается, но при реальных значениях количества узлов он имеет существенное значение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. По результатам анализа концепций Интернета Вещей, Тактильного Интернета и Интернета Навыков установлено, что сети связи пятого поколения являются сверхплотными сетями с ультра малыми задержками, что требует разработки новых методов их построения.

2. Поскольку предыдущие поколения сетей не обладали указанными в п.1. выводов свойствами, для реализации требований по сверх плотности и ультра малым задержкам требуется применение новых технологий, таких как программно-конфигурируемые сети SDN, виртуализация сетевых функций NFV, мобильные граничные вычисления MEC, взаимодействия устройство-устройство D2D.

3. Помимо изменения собственно методов построения сетей связи пятого поколения, требуются изменения методов идентификации, тестирования и иных, сопутствующих обеспечению устойчивого функционирования сетей связи пятого поколения технологий. В диссертационной работе предложено для идентификации в сверхплотных сетях использовать технологию идентификации на основе архитектуры цифровых объектов DOA. Для исследований, тестирования и верификации сетей связи пятого поколения в диссертационной работе предложена новая структура модельной сети, реализованная на кафедре сетей связи и передачи данных СПбГУТ, используемая для исследований характеристик Тактильного Интернета и Интернета Навыков.

4. Разработана методика кластеризации сети связи, отличающаяся тем, что кластеризация осуществляется в условиях предоставления услуг сетей с ультра малыми задержками, что приводит как к децентрализации сети, так и создает предпосылки для децентрализации экономики в целом.

5. Разработана модель сети связи 2030 года, отличающаяся от известных представлений тем, что в основе построения такой сети лежат сети связи с ультра малыми задержками. Сверхплотные сети при создании сетей связи 2030 пополнятся элементами наномира, а сети связи с ультра малыми задержками позволят реализовать телеприсутствие как в форме роботов аватаров, принадлежащих пользователям и выполняющих их команды с максимальным соответствием тактильным ощущениям конкретного пользователя, так и виде голографического телеприсутствия, например, на спортивных мероприятиях.

6. Установлено, что D2D-технологии в условиях низкой плотности пользователей и устройств имеют даже большую эффективность за счет низкого уровня помех, и как следствие, улучшения QoS и достижимой дальности связи. Потенциальные возможности D2D технологий позволяют объединить в сеть значительное количество устройств, если последние имеют функциональные возможности маршрутизации трафика. Существующая абонентская плотность терминалов позволяет построить сеть с высокой вероятностью связности, что дает потенциальную возможность доставки данных, используя только ресурсы конечных устройств.

7. Определена неизвестная ранее зависимость мощности помех от плотности размещения узлов сети и величины трафика и получена эмпирическая формула для такой зависимости.

8. Предложен метод маршрутизации трафика в сетях связи пятого поколения и алгоритм его реализации при использовании технологий D2D, отличающийся от известных тем, что выбор маршрута осуществляется на основе комплексного критерия максимума пропускной способности и минимума числа транзитов.

9. Предложен метод построения сети D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов, отличающийся тем, что дополнительные маршрутизаторы представляют собой широко используемые терминалы сетей связи.

10. Разработан метод построения сети D2D с использованием дополнительных маршрутизаторов, представляющих собой широко используемые терминалы сетей связи, и методика выбора местоположения и числа транзитных узлов на основе модифицированного алгоритма FOREL, для которого в качестве метрики используется значение величины отношения сигнал/шум плюс интерференция SINR, что позволяет увеличить пропускную способность сети D2D как минимум на 10–20 %.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях**

1. Бородин А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 5. – С. 45-49.
2. Бородин А.С. Особенности использования D2D-технологий в зависимости от плотности пользователей и устройств / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 40-45.
3. Бородин А.С. Интернет навыков / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Выборнова, В.Д. Фам, А. Ястребова // Электросвязь. – 2018. № 1. С. 55-65.
4. Бородин А.С. Сети связи 2030 / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2018. – № 11. – С. 52-56.
5. Бородин А.С. Маршрутизация трафика в сети беспроводной связи, построенной на базе D2D-технологий / А.С. Бородин, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2019. – № 2. – С. 38-44.
6. Бородин А.С. Метод построения сети связи на базе D2D-технологий с использованием дополнительных маршрутизаторов / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2019. – № 4. – С. 20-26.

**Научные статьи, опубликованные в изданиях,  
индексируемых в международных базах данных**

7. Borodin A. Future Networks 2030: Architecture & Requirements / Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Koucheryavy A. // 10<sup>th</sup> International Congress ICUMT, 2018.

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях  
и материалах научных конференций**

8. Бородин А.С. Архитектуры промышленного Интернета Вещей / Т.А. Москаленко, Р.В. Киричек, А.С. Бородин // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5. – № 4. С. 49-56.
9. Бородин А.С. Обзор и сравнительный анализ методов идентификации устройств Интернета вещей / И.И. Мартынова, В.А. Кулик, А.С. Бородин, Р.В. Киричек // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2017. – С. 219-221.
10. Бородин А.С. Метод регулирования воздушного движения БПЛА в умных городах и сообществах / А.Н. Бондарев, А.С. Бородин, Р.В. Киричек // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2017. С. 186-188.
11. Бородин А.С. Подходы к исследованию методов идентификации устройств и виртуальных сущностей Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов / Т.А. Москаленко, Р.В. Киричек, А.С. Бородин // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017. С. 178-179.

Подписано в печать 24.04.2019. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1