

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I»

(ФГБОУ ВО ПГУПС)

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031

тел. (812) 457-86-28, факс (812) 315-26-21, e-mail: [dou@pgups.edu](mailto:dou@pgups.edu),

<http://www.pgups.ru>

ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502, ИНН 7812009592/КПП 783801001

## Отзыв официального оппонента

Канаева Андрея Константиновича на диссертацию по теме «Разработка и исследование комплекса моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи», представленную к защите в Диссертационном совете Д 219.001.04 на базе ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

## Актуальность темы диссертации

Традиционно новые концепции развития телекоммуникационных сетей были дифференцированы на стационарные сети и сети подвижной связи. В этой связи существовало параллельное развитие технологий, стандартов и научных школ, занимавшихся исследованием таких сетей. С развитием концепции Интернета вещей наблюдается объединение различных сетей и технологий, что привело к появлению еще одного класса - гетерогенных сетей, включающих в себя многообразие технологий связи для организации беспроводного подключения устройств интернета вещей к Интернету и передаче данных в облачные сервисы. Процесс объединения стационарных сетей и беспроводных сетей, построенных на различных технологиях, выявил

сложности их совместного функционирования, в том числе в части обеспечения приемлемого качества обслуживания. Гетерогенные сети характеризуются возможностью соединять источники трафика с различными операционными системами и протоколами передачи данных, что достаточно трудно реализовать ввиду особенностей форматов служебных сообщений различных технологий, а также метаданных протоколов передачи данных. Кроме этого, количество устройств, подключаемых к сети и осуществляющих отправку данных на базе различных беспроводных технологий с каждым днем увеличивается, что приводит к нарушению нормального функционирования оборудования (шлюзов и базовых станций), ориентированного для подключения абонентов гомогенных сетей.

В этой связи можно констатировать, что необходима разработка новых моделей и методов взаимодействия устройств и распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи. В диссертационной работе Е.А. Кучерявый предложил новый комплекс моделей и методов исследования и анализа задач распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи, который позволяет обеспечить рассмотренные выше потребности и тем самым считать тему диссертационной работы весьма актуальной.

#### **Степень обоснованности, достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования и широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на Международных конференциях.

Основные результаты диссертации, обладающие научной новизной:

1. Предложена новая методология исследования распределения ресурсов в гетерогенных сетях связи, отличающаяся от известных комплексным анализом и синтезом различных технологий радиодоступа.

2. Предложен новый критерий оптимизации распределения ресурсов в гетерогенных сетях связи, отличающийся от известных тем, что справедливое распределение ресурсов для гетерогенных сетей с учетом требуемого баланса

между сетевыми возможностями и пропускной способностью достигается за счет использования критерия max-min, основанного на полосе пропускания. Целевая функция при этом дополняется весовыми коэффициентами на основе мгновенных значений спектральной эффективности.

3. Разработан метод управления производительностью гетерогенных радиотехнологий доступа H-CRAN, отличающийся от известных тем, что используется кооперативное управление посредством менеджера кооперативных радиоресурсов CRRM в H-CRAN в реальном масштабе времени на основе динамического управления ресурсами двух альтернативных метрик: справедливого распределения ресурсов для пользователей всех доступных сетей радиодоступа и общей производительности системы.

4. Предложена новая архитектурная реализация взаимодействия беспроводных сетей 3GPP и IEEE, отличающаяся от известных тем, что используется разработанный в диссертационной работе «Шлюз входа в сеть доступа» (AAGW), обеспечивающий такое совместное функционирование сетей 3GPP и IEEE, при котором не требуется использование ни операторской магистральной сети, ни Интернета.

5. Разработана методология эффективного распределения мощности передачи и схема управления мощностью для одновременно функционирующих двух и более радиотехнологий доступа устройств в гетерогенной сети, максимизирующая энергоэффективность мобильного устройства при удовлетворении минимальной требуемой скорости передачи пользовательских данных.

6. Разработаны модель и метод облачной клиентской ретрансляции, которые, в отличие от известных, учитывают особенности трафика для устройств M2M, расположенных на границе соты.

7. Разработаны модель и метод выгрузки трафика в гетерогенных сетях, отличающиеся от известных тем, что для выгрузки трафика используется технология WiFi Direct.

8. Разработаны модель и метод распределения ресурсов для взаимодействия D2D в гетерогенных беспроводных сетях, отличающиеся от

известных использованием новой технологии сетевой поддержки D2D, что позволяет существенно сократить общие энергозатраты в гетерогенной зоне базовой станции и увеличить пропускную способность сети в целом.

9. Разработаны модель и метод доступа устройств M2M к ресурсам системы LTE, отличающиеся от известных учетом специфики обслуживания данных малого объема, что позволяет организовать эффективное обслуживание трафика M2M в LTE.

10. Разработаны модель и метод доставки данных от M2M устройств в гетерогенных сетях 3GPP NB-IoT с возможностью клиентской ретрансляции, позволяющие для ряда сценариев как повысить вероятность доставки сообщений, так и повысить энергоэффективность передающих узлов.

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях и семинарах: IEEE Globecom: Anaheim CA, USA 2012, Atlanta GA, USA 2013, San Diego CA, USA 2015, Washington DC, USA 2016, Singapore 2017; IEEE ICC (IEEE International Conference on Communications): Budapest Hungary 2013, Sydney Australia 2014, London UK 2015, Kuala Lumpur Malaysia 2016; IEEE CAMAD (IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks) Kyoto, Japan 2011; IFIP WWIC (International Conference on Wired/Wireless Internet Communication) Vilanova i la Geltrú, Spain 2011, Santorini Greece 2012, St. Petersburg Russia 2013; DCCN (International Conference on Distributed Computer and Communication Networks), ИПУ РАН, Moscow, Russia, 7-10 октября 2013; Конференции «XLIII Неделя науки Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия, 4-5 декабря 2014; Юбилейной 70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия, 1-11 февраля 2017 г.; семинарах НИУ ВШЭ, РУДН, МТУСИ, ИПУ РАН, СПб ГУТ.

## Теоретическая и практическая ценность работы

Теоретическая значимость работы обусловлена, прежде всего, разработкой новой методологии исследования процессов распределения ресурсов в гетерогенных сетях связи, отличающейся комплексным рассмотрением различных радиотехнологий доступа. Новая методология исследований не только позволила в явном виде решить ряд сложнейших задач для гетерогенных сетей связи, но может быть широко использована и для различных приложений в области сетей и систем связи, например, для Интернета Вещей. Важнейшим теоретическим результатом является определение нового критерия оптимизации распределения ресурсов в гетерогенных сетях связи, отличающегося от известных тем, что справедливое распределение ресурсов для гетерогенных сетей с учетом требуемого баланса между сетевыми возможностями и пропускной способностью достигается за счет использования критерия  $\max\text{-min}$ , основанного на полосе пропускания. Метод управления производительностью гетерогенных облачных радиотехнологий доступа H-CRAN с использованием кооперативного управления посредством менеджера кооперативных радио ресурсов в реальном масштабе времени представляет собой важный вклад в исследования гетерогенных сетей связи. Разработанный комплекс моделей и методов позволяет адекватно текущему уровню развития сетей и систем телекоммуникаций решить целый ряд новых задач по выгрузке трафика, предотвращению перегрузок, а также проводить оптимизацию распределения радиоресурсов и сокращения общих энергозатрат при наличии множества радиотехнологий доступа. Все это в целом вносит существенный вклад в развитие теории массового обслуживания и теории телетрафика. Практическая ценность работы состоит в создании научно-обоснованных рекомендаций по созданию и планированию гетерогенных сетей связи. Самостоятельную практическую ценность имеет разработанная под руководством автора система имитационного моделирования WINTERsim, используемая рядом научно-исследовательских групп. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «Ростелском» при выполнении НИР по современным технологиям для модернизации сетей связи

в направлении создания сетей 5G, в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке методики по планированию гетерогенных сетей связи, в Российском университете дружбы народов при создании модельной распределенной сети для исследования и оптимизации работы механизмов в системах связи нового поколения 5G, в «Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики» при чтении лекций и проведении практических занятий.

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертации изложены в 78 опубликованных работах, в том числе в трех монографиях, 12 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; в 63 работах, опубликованных в трудах, индексируемых Scopus, из них 51 индексируемых в Web of Science.

### **Содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 416 страниц, включая 102 рисунка, 20 таблиц, список литературы из 318 наименований. В приложении к диссертационной работе приведены документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведен обзор публикаций по этой теме, сформулирована суть поставленной и решенной научной проблемы, предмет и объект исследований, цель и задачи исследований, кратко изложены содержание и основные результаты диссертации по главам, охарактеризованы их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первом разделе диссертационной работы основное внимание уделяется гетерогенным сетям как таковым и их взаимодействию с облачными структурами сети доступа. В разделе рассмотрено понятие взвешенного справедливого распределения ресурсов для гетерогенных беспроводных сетей. Для оценки предложенного подхода в диссертационной работе были исследованы облачная сеть радиодоступа типовой структуры и с менеджером

кооперативных радио ресурсов CRRM.

Во втором разделе разработана новая архитектура гетерогенной сети с использованием предложенного в диссертации «Шлюза входа в сеть доступа» (AAGW). Разработан алгоритм выбора мощности передачи мобильного устройства в условиях наличия двух и более радиотехнологий, способных функционировать одновременно. Предложен простой эвристический метод выбора мощности передачи устройства в гетерогенной сети, удовлетворяющий заданным ограничениям и демонстрирующий высокую энергоэффективность.

Третий раздел посвящен вопросам клиентской ретрансляции. Предложена схема клиентской ретрансляции для улучшения показателей задержки и энергетической эффективности для граничных ячеек M2M устройств в условиях плохого качества связи. Определены основные характеристики производительности для предложенной структуры, такие как пропускная способность, задержки и энергетическая эффективность. Получены аналитические выражения и верифицированы путем имитационного моделирования на системном уровне.

В четвертом разделе диссертационной работы предложены и исследованы модели и методы выгрузки трафика в беспроводных гетерогенных сетях. Разработана новая технология поддержки соединений D2D со стороны сети и методы распределения ресурсов с целью сокращения общих энергозатрат. Представлены результаты натурных экспериментов на базе модельной сотовой сети Технологического Университета Брно (BUT) в Чехии.

Раздел 5 посвящен задачам внедрения Интернета вещей в сетях IEEE 802.11ah и 3GPP LTE. Построена аналитическая модель IEEE 802.11ah и полученные результаты, такие как пропускная способность и вероятность коллизии, полученные для различных условий, проверены при помощи имитационного моделирования. Разработаны модель и метод доступа устройств M2M к ресурсам LTE.

В разделе 6 диссертационной работы рассматриваются задачи внедрения Интернета Вещей в условиях развертывания узкополосной технологии

передачи данных 3GPP NB-IoT. Разработана аналитическая модель для исследования характеристик обработки трафика NB-IoT при наличии конкурирующего трафика LTE. Для оценки эффекта ретрансляции разработана новая аналитическая модель, которая учитывает особенности «краудсорсинга» на основе ретрансляторов, мобильность вспомогательных транспортных средств и важные особенности технологии NB-IoT.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В разделе научной новизны автор указывает на предложенную им методологию исследования распределения ресурсов в гетерогенных сетях. Однако в явном виде в работе методология как множество элементов со взаимосвязями не представлена, а распределена по главам работы 3-6. Это затрудняет понимание ее общих свойств и принципов ее применения для исследований.

2. В одном из положений автор говорит о том, что им предложена новая архитектурная реализации взаимодействия беспроводных сетей. Однако из текста работы следует, что изменением в архитектуре является введение нового элемента - шлюза входа в сеть доступа (AAGW). Введение данного устройства можно было бы считать изменяющим архитектурную реализацию взаимодействия беспроводных сетей, если бы автор показал изменение структурных, функциональных и потоковых связей между элементами. Однако автор ограничился лишь их описанием.

3. В разделе 2.4. автор решает актуальную задачу повышения энергоэффективности устройств в гетерогенных сетях связи. При этом в выводах появляется утверждение про решение задачи управления мощностью устройства. Полученные автором решения действительно могут быть реализованы в устройствах управления мощностью устройства, однако в явном виде процессов управления и схем, их реализующих в работе не приведено.

4. Разрабатываемые в разделе 5.5. математические модели в качестве оцениваемого параметра содержат «пропускную способность системы». При этом отсутствует определение данного параметра и необходимые допущения



и ограничения для процессов моделирования, без которых сложно оценить представленные результаты моделирования.

5. В разделе 6.5. автором представлен ряд аналитических моделей для технологии NB-IoT. Однако результаты моделирования для рассматриваемой технологии приведены только с применением имитационного моделирования в разделе 6.7. Наличие обоих результатов моделирования и их сравнение позволило бы более детально изучить закономерности в процессах функционирования технологии NB-IoT.

6. В 6 разделе диссертации вычисляется средняя задержка передачи сообщения в NB-IoT, что не совсем корректно ввиду того, что сети и устройства NB-IoT ориентированы на передачу телеметрии через определенные промежутки времени и относятся к классу сетей толерантных к задержкам (DTN).

Отмеченные замечания не носят определяющего характера и не снижают ценность проведенного исследования.

### **Выводы и заключение**

Диссертационная работа Е.А. Кучерявого, посвященная решению научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, а именно: разработке и исследованию комплекса моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи, является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой обладают научной новизной и практической значимостью. Материалы исследования в достаточно полном объеме отражены в публикациях автора и прошли апробацию на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа «Разработка и исследование комплекса моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи» полностью соответствует критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени доктора наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской

Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции от 28.08.2017).), а ее автор Кучерявый Евгений Андреевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

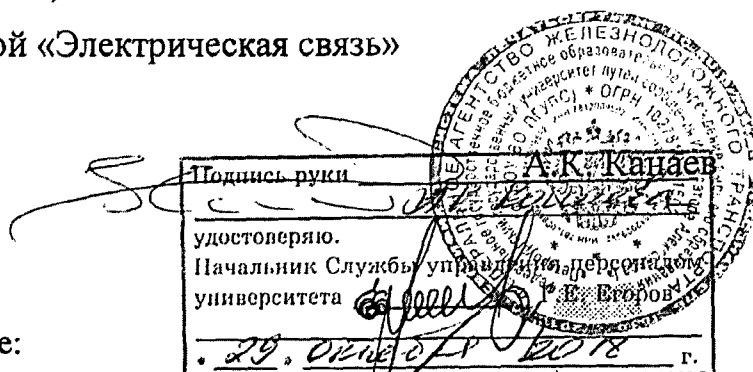
«15» октября 2018 г.

Официальный оппонент,

Заведующий кафедрой «Электрическая связь»

ФГБОУ ВО ПГУПС

д.т.н., профессор



Сведения об оппоненте:

Канаев Андрей Константинович, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук по специальностям 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, профессор по специальности 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, заведующий кафедрой «Электрическая связь», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский университет путей сообщения Императора Александра I». Адрес: 190031, г.Санкт-Петербург, Московский пр., д.9, ПГУПС; <https://pgups.ru/>, 8-812-315-26- 21, dou@spgups.ru