

На правах рукописи



КУЧЕРЯВЫЙ

Евгений Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ
И МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В БЕСПРОВОДНЫХ
ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в «Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики»

Научный консультант:

САМУЙЛОВ Константин Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Российский университет дружбы народов”, заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей.

Официальные оппоненты:

СИБЕРС Мстислав Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича», профессор кафедры радиосвязи и вещания;

КАРТАШЕВСКИЙ Вячеслав Григорьевич – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжская Государственная академия телекоммуникаций и информатики», заведующий кафедрой мультисервисных сетей и информационной безопасности;

КАНАЕВ Андрей Константинович – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой электрической связи.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН», г. Москва.

Защита состоится «15» ноября 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 219.001.04 на базе ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ): <http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Kucheryavyu/dis-Kucheryavyu.pdf>

Автореферат разослан «___»

2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.001.04
кандидат технических наук, доцент

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Начало 21 века в области сетей и систем связи ознаменовалось появлением целого ряда технологий, которые до этого временного периода практически не использовались на сетях связи общего пользования (ССОП). Речь идет о получивших уже широкое распространение беспроводных сенсорных сетях (БСС) со всевозможными услугами и приложениями, сетях автомобильного транспорта, медицинских сетях и т.п. Разрозненное поначалу, внедрение этих сетей потребовало создания концепции, которая смогла бы не только объединить их, но и стать основой дальнейшего развития сетей и систем телекоммуникаций. Такая концепция была сформирована на базе понимания развития сети как сети не только пользователей, но и устройств, машин и т.п., получив название Интернета Вещей. Следует сразу же отметить, что концептуально Интернет Вещей смог объединить сети, ориентированные на приложения для различных отраслей, с различными требованиями по качеству обслуживания и качеству восприятия, различными характеристиками трафика, сосуществующие одновременно на одной и той же территории, в одной и той же зоне базовой станции, использующими, к тому же, и разнообразные радиотехнологии. Все вышесказанное привело к появлению гетерогенных сетей, модели и методы анализа которых существенно отличаются от гомогенных сетей связи. При этом в очередной раз успешное применение должна была найти и нашла теория конвергенции, предусматривающая объединение ресурсов сетей и систем с одновременным единообразным предоставлением услуг пользователям, а теперь еще и вещам. Задачи исследования гетерогенных сетей, одни из важнейших в области сетей и систем телекоммуникаций, находятся в центре внимания в диссертационной работе.

Гетерогенность сети стала в явном виде себя проявлять уже на этапе создания систем связи долгосрочной эволюции LTE (Long Term Evolution), явившихся технологической основой появления сетей связи 4G. Успешный опыт создания и внедрения систем LTE позволил научному и инженерному сообществу перейти к следующему этапу развития сетей и систем телекоммуникаций, сетям пятого поколения, которые будут строиться на иных архитектурных принципах нежели все предыдущие поколения. Эти сети будут являться в полной мере гетерогенными, объединяя при этом ресурсы и как мобильных сетей телекоммуникаций, так и

стационарных. Подобные беспроводные гетерогенные сети будут являться сетями, поддерживающими различные типы взаимодействий, поддерживать сверх высокую плотность пользователей, предоставлять качество обслуживания радикально разным типам трафика, что потребует для них не только разработки новых моделей и методов анализа, но даже и другой методологии распределения ресурсов (англ. Resource allocation) в сети. Кроме того, в силу ограниченной емкости беспроводных сетей на системном уровне, не очевидным является традиционное осуществление доступа через узлы сети, например, базовые станции. Появляется технология прямого взаимодействия D2D (англ. device-to-device), образующая в широком смысле и соответствующие сети D2D, для которых должны быть разработаны модели и методы анализа, в том числе и при кооперированном функционировании совместно с базовой сетью. В диссертационной работе исследования сосредоточены на разработке комплекса взаимоувязанных моделей и методов распределения ресурсов именно в гетерогенных беспроводных ССОП с учетом концепции Интернета Вещей, возможностей совместного функционирования при реализации современных сетей доступа в условиях использования множества радиотехнологий доступа, при широкомасштабном использовании межмашинного взаимодействия M2M (англ. machine-to-machine) и применении сетей D2D в условиях функционирования совместно с базовой сетью. Для проведения исследований в диссертационной работе разработана новая методология распределения ресурсов в гетерогенных сетях, отличающаяся комплексным рассмотрением различных радиотехнологий доступа.

Более того, исследование и анализ показателей качества беспроводных гетерогенных сетей практически невозможны без комплексного подхода к созданию моделей, в том числе математических, и разработке адекватных методов распределения сетевых ресурсов. Именно созданию такого комплексного подхода посвящена тема настоящей диссертационной работы, что и обосновывает ее актуальность.

Разработанность темы исследования. Существует множество работ в области гетерогенных сетей связи различных научных школ как в Российской Федерации, так и во всем мире. Эта тематика в настоящее время является не только основной в исследовательских проектах, но и чрезвычайно востребованной вследствие своей новизны и новизны используемых моделей и методов. Вместе с тем, большинство основополагающих задач еще не решены, в том числе и на методологическом уровне.

Для решения задач создания моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных сетях телекоммуникаций используются теория телетрафика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, теория графов, а также теория имитационного моделирования. Определяющий вклад в развитие теории массового обслуживания внесли российские и зарубежные ученые Г.П. Башарин, В.М. Вишневский, А.Н. Дудин, В.Г. Карташевский, Е.А. Крук, Б.С. Лившиц, Е.В. Морозов, А.Н. Назаров, Ю.Н. Орлов, К.Е. Самуйлов, С.Н. Степанов, Н.А. Соколов, А.П. Пшеничников, Я.В. Фидлин, О.И. Шелухин, М.А. Шнепс, А.Д. Харкевич, Г.Г. Яновский, V.-B. Iversen, M. Gerla, F. Kelly, P.J. Kuhn, L. Kleinrock, K.W. Ross, W. Whitt и др.

В диссертации в отличие от известных подходов к распределению ресурсов в гетерогенных сетях телекоммуникаций предложена методология комплексного исследования особенностей применения радиотехнологий доступа. Выбор рациональной архитектуры и оптимизация распределения ресурсов в сетях доступа являются принципиальными задачами, поскольку гетерогенность сети проявляется, в первую очередь, как раз на доступе при множестве используемых радиотехнологий и сетях, обеспечивающих различные приложения. Исследованию гетерогенных сетей доступа в сетях связи посвящены работы отечественных и зарубежных ученых А.С. Аджемова, В.М. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, А.Е. Кучерявого, К.Е. Самуйлова, М.А. Сиверса, В.О. Тихвинского, J. Andrews, N. Himayat, F. Baccelli, S. Rangan, T. Rappoport, S. Singh, и др.

В диссертации в отличие от известных подходов предложены и исследованы гетерогенные сети доступа при кооперативном управлении посредством менеджера кооперативных радиоресурсов CRRM в H-CRAN в реальном масштабе времени на основе динамического управления с учетом справедливого распределения ресурсов для пользователей всех сетей радиодоступа и общей производительности системы.

Одна из наиболее актуальных проблем в последние годы – анализ эффективности функционирования приложений концепции Интернета Вещей в условиях гетерогенных сетей радиодоступа. В этом направлении большой вклад внесли отечественные и зарубежные ученые А.Е. Кучерявый, А.В. Росляков, А.И. Парамонов, Р.В. Киричек, M. Dohler, H. Yanikomeroglu, J. Hoesek и др. В диссертационной работе для решения этих проблем предложены и исследованы

модели и методы при применении клиентской ретрансляции для улучшения качества обслуживания устройств M2M, а также выявления и предотвращения перегрузки в таких сетях с учетом передачи данных малого объема.

Увеличение производительности гетерогенных систем в целом и, как следствие улучшение качества обслуживания, может быть достигнуто за счет выгрузки трафика. Проблемами выгрузки трафика в гетерогенных сетях, включая сети 4G/5G, занимались отечественные и зарубежные ученые Ю.В. Гайдамака, К.Е. Самуйлов, С.Н. Степанов, В.А. Наумов, J. Andrews, J. Araniti, M. Dohler и др. В отличие от известных работ в диссертации предложены и исследованы модели и методы выгрузки трафика в сети D2D, использующие радиотехнологию WiFi Direct. При этом предложена и исследована новая архитектура функционирования сетей D2D с поддержкой от базовой сотовой сети.

С точки зрения комплекса моделей распределения ресурсов в гетерогенных сетях созданы все теоретические предпосылки и практические наработки, позволяющие в данной диссертационной работе предложить и исследовать комплекс взаимоувязанных по структурным и нагрузочным параметрам моделей и методов распределения ресурсов для гетерогенных сетей связи, отличающийся от известных как использованием новой методологии анализа таких сетей, так и взаимным дополнением совместимых моделей и методов при предстоящем широкомасштабном внедрении технологий M2M и D2D с использованием новых методов выгрузки трафика при взаимодействии сетей в гетерогенных условиях и кооперативных методов управления в облачных сетях доступа.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются беспроводные гетерогенные радиотехнологии доступа, а предметом исследования – модели и методы распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в разработке и исследовании комплекса взаимоувязанных моделей и методов распределения ресурсов в современных и перспективных гетерогенных беспроводных сетях связи общего пользования.

Цель работы достигается путем последовательного решения следующих задач:

- анализ существующих моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных сетях связи;

- разработка методологии распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи, адекватной их типовой структуре;
- поиск нового критерия оптимизации распределения ресурсов в сетях связи для обеспечения справедливого распределения ресурсов в гетерогенных сетях с учетом требуемого соотношения между сетевыми возможностями и пропускной способностью;
- разработка методологии оптимизации производительности гетерогенных сетей радиотехнологий доступа H-CRAN с использованием кооперативного управления в реальном масштабе времени;
- разработка новых архитектурных решений для гетерогенных сетей связи, не требующих обеспечения доступа ни в операторскую магистральную сеть, ни в Интернет при использовании технологий WLAN, в том числе для пользовательского оборудования не-3GPP стандарта;
- разработка модели и метода выгрузки трафика в гетерогенных сетях с использованием технологии WiFi Direct и практическая реализация, развернутая на тестовой сети LTE;
- разработка модели и метода распределения ресурсов для взаимодействия D2D в гетерогенных сетях при наличии сетевой поддержки;
- разработка модели и метода анализа механизмов доставки данных от M2M устройств в сеть LTE, в том числе при использовании технологии NB-IoT;
- разработка модели и метода доступа устройств M2M к ресурсам систем LTE с учетом специфики обслуживания данных малого объема.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

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 $\max\text{-min}$, 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 устройства 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.

Таким образом, в диссертационной работе создан новый комплекс моделей и методов исследования и анализа задач распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы обусловлена, прежде всего, разработкой новой методологии исследования 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 «Ростелеком» 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.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории вероятностей, теории массового обслуживания и теории телетрафика, имитационного и натурального моделирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Критерий оптимизации, для которого справедливое распределение ресурсов для гетерогенных сетей с учетом баланса между потоками трафика с разными требованиями к пропускной способности обеспечивается использованием модифицированного критерия $\max\text{-min}$, основанного на доступной полосе пропускания позволяет достичь до 60% лучшего значения 5% квантиля производительности соты по сравнению с критериями, не учитывающими динамику изменений характеристик радиоканала.
2. Метод управления производительностью гетерогенной облачной сети радиодоступа H-CRAN с использованием менеджера управления кооперативными радиоресурсами CRRM в реальном масштабе времени на основе двух альтернативных метрик справедливого распределения ресурсов для пользователей всех доступных сетей радиодоступа позволяет более чем

- в 2 раза увеличить общую производительность мультиуровневой системы радиодоступа.
3. Новый архитектурный элемент «Шлюз входа в сеть доступа» (AAGW), реализованный в соответствии со стандартами 3GPP, позволяет взаимодействовать технологиям 3GPP и IEEE и обеспечивает значительное сокращение сквозных задержек вследствие того, что трафик не нуждается в транзите на удаленный шлюз 3GPP PDN, и существенное сокращение капитальных затрат на развертывание дополнительной инфраструктуры 3GPP.
 4. Модель выбора эффективной мощности передачи и метод управления мощностью мобильного устройства в условиях двух и более радиотехнологий доступа максимизирует энергоэффективность мобильного устройства при обеспечении минимально требуемой скорости передачи.
 5. Модель и метод облачной клиентской ретрансляции, учитывающие особенности трафика для устройств M2M, расположенных на границе соты, позволяют увеличить производительность системы в 3 - 4 раза при уменьшении в несколько раз задержки пакетов.
 6. Модели и методы выгрузки трафика в гетерогенных сетях, использующие для выгрузки трафика технологию D2D на базе WiFi Direct с сетевой поддержкой, обеспечивают удвоение пропускной способности соты и повышение энергоэффективности до 6 раз.
 7. Модель и метод доступа устройств M2M к ресурсам сети LTE на основе модифицированной процедуры COBALT, учитывающие особенности передачи данных малого объема, позволяют уменьшить задержку пакетов по сравнению с методом PUSCH почти для 85% типов трафика и одновременно в 2 - 3 раза снизить энергопотребление по сравнению с методом PRACH.
 8. Модель и метод доставки данных от M2M устройств в гетерогенных сетях 3GPP NB-IoT с возможностью клиентской ретрансляции, позволяют для ряда сценариев как повысить вероятность доставки сообщений, так и повысить энергоэффективность передающих узлов.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного

моделирования и 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 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.

Публикации. 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.

Структура и объем работы. 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.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены при его непосредственном участии и под научным руководством.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций и

соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 3, 5, 11, 12, 14.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, анализируется состояние исследований в предметной области диссертации, формируются цель и задачи исследования, приводится научная новизна основных результатов работы и положения, выносимые на защиту, а также сведения о достоверности и апробации результатов работы, личном участии автора и соответствии паспорту специальности.

В первом разделе диссертационной работы основное внимание уделяется гетерогенным сетям как таковым и вопросам их функционирования.

Каждая из радиотехнологий имеет свои собственные специфические архитектуру и принципы передачи данных, эффективное одновременное использование множества радиотехнологий является одной из ключевых особенностей гетерогенной сети. Существует два подхода к реализации этой особенности. Первый состоит в создании централизованного координатора, который будет обеспечивать управление всеми ассоциированными сетями радиодоступа. Однако необходимость соответствующих сигнальных процедур делает этот подход осуществимым только тогда, когда отдельная спецификация каждой из радиотехнологий разрабатывается как часть некоей взаимоувязанной структуры (например, будущие версии 3GPP). Альтернативный подход заключается в том, что возможно делегировать функцию выбора радиотехнологии самому пользовательскому оборудованию посредством обеспечения его всей необходимой информацией. Однако это решение может быть весьма далеко от эффективного, особенно в динамических условиях, поскольку оно предполагает достаточно большую гибкость как в решениях производителей мобильных устройств, так и конечных пользователей. Далее в разделе 1 производится сравнение обоих подходов на базе модифицированного критерия справедливости распределения ресурсов max-min, основанного на доступной полосе пропускания беспроводного канала с использованием для таких задач индекса Джейна.

Типовой сценарий гетерогенных сетей, рассматриваемый в диссертации, включает следующие системные составляющие: простая макро сотовая базовая станция, несколько пико сотовых базовых станций и точки доступа WiFi, а также пользовательские узлы с различными радиотехнологиями (например, WiFi и LTE), и

фактически отражает принятую 3GPP за основу трехуровневую конвергентную сеть, представленную на рисунке 1.

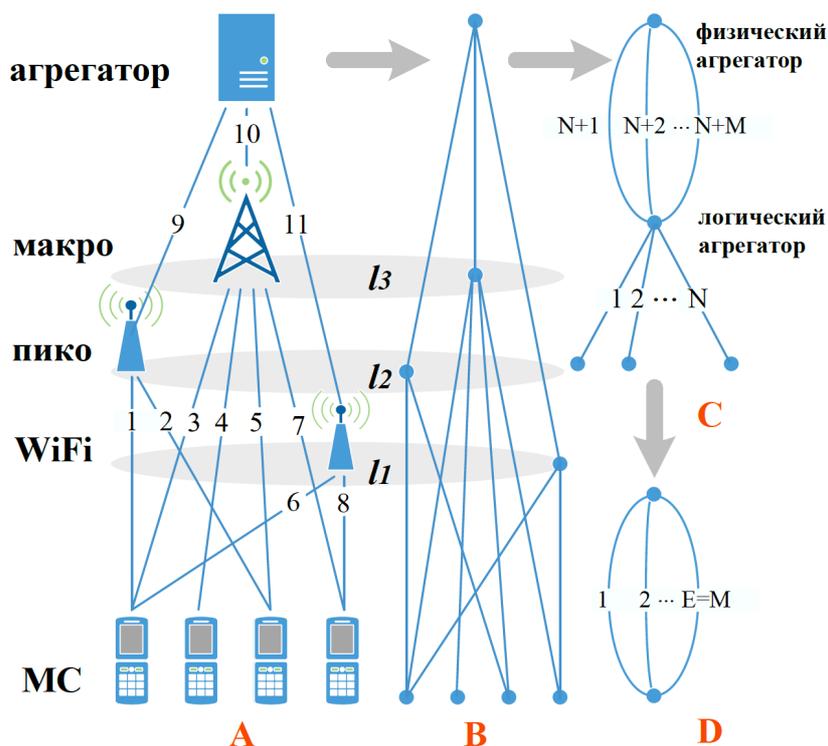


Рисунок 1 – Формализация трехуровневой системной топологии

Для учета надлежащим образом баланса между сетевыми возможностями и распределением пропускной способности, в диссертационной работе предложено использовать основанный на полосе пропускания max-min критерий справедливости. Обозначая N как число требований, которые должны быть обслужены сетью в некоторый момент времени, h_d как множество доступных ресурсов и P_d как число путей, доступных для обслуживания запросов $d, d = 1, 2, \dots, N$. Далее пусть набор путей для запроса d записан как

$$P_d = \{P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dP_d}\}, \quad d = 1, 2, \dots, N,$$

На практике, P_d – это число базовых станций на всех уровнях гетерогенной сети, с которыми ассоциирован конкретный пользователь. Далее пусть

$$x_{dp}, \quad d = 1, 2, \dots, N, p = 1, 2, \dots, P_d,$$

представляют собой потоки с частью запроса d через путь p . Для распределения ресурсов, основанных на полосе пропускания, эти переменные потоков измеряются в бит/с. В ином случае, когда спектральная эффективность конечных узлов принимается во внимание, переменные потоков x_{dp} измеряются в Гц. Далее в разделе

показано, что вводя вектор распределения ресурсов как

$$\vec{h} = (h_1, h_2, \dots, h_N), \quad h_d = \sum_{p=1}^{P_d} x_{dp}$$

проблема оптимизации является лексикографической максимизацией вектора распределения ресурсов с заданными ограничениями по запросам и пропускной способности.

Таким образом, вследствие базовых характеристик критерия max-min, модифицированный критерий не допускает бесконечно малых скоростей, в то время как все пользователи обеспечены примерно одинаковым набором частот, и, в то же время, высокие скорости ограничены возможностями схемы модуляции и кодирования, которые определяются конкретной радиотехнологией. Предложенный критерий выражается в целевом компромиссе между пропускной способностью системы (повышение эффективности от естественного динамичного выбора схемы модуляции и кодирования) и справедливым распределением скорости передачи данных.

Далее в разделе проводится сравнение производительности трехуровневой конвергентной сети при использовании трех различных схем распределения ресурсов: WiFi-предпочтительная (WiFi Preferred, WP), максимального использования (Maximum Usage, MU) и на базе критерия max-min основанного на полосе пропускания (Max-Min, MM). На рисунке 2 представлены соответствующие результаты, представленные в виде двух графиков: слева – диаграмма пропускной способности, справа – взвешенная справедливая и средняя пропускная способность. Диаграмма показывает, что результаты WiFi-предпочтительной схемы в наибольшей степени сконцентрированы в верхней и нижней частях графика. В свою очередь результаты схемы максимального использования расположены почти везде, а результаты схемы max-min имеют тенденцию группироваться около центра графика, получая таким образом наилучшее справедливое распределение ресурсов.

Для оценки предложенного модифицированного критерия max-min было также проведено сравнение эффективности существующей типовой структуры облачной сети радиодоступа с предложенным в диссертационной работе методом управления производительностью гетерогенной облачной сети радиодоступа H-CRAN с использованием менеджера управления кооперативными радиоресурсами CRRM в

реальном масштабе времени. Результаты сравнения приведены на рисунке 3 для трех различных сценариев: WiFi и макро сота LTE (левая часть), пико и макро соты LTE (центральная часть) и, наконец, полностью гетерогенный сценарий с интеграцией макро соты LTE, WiFi и пико сот LTE.

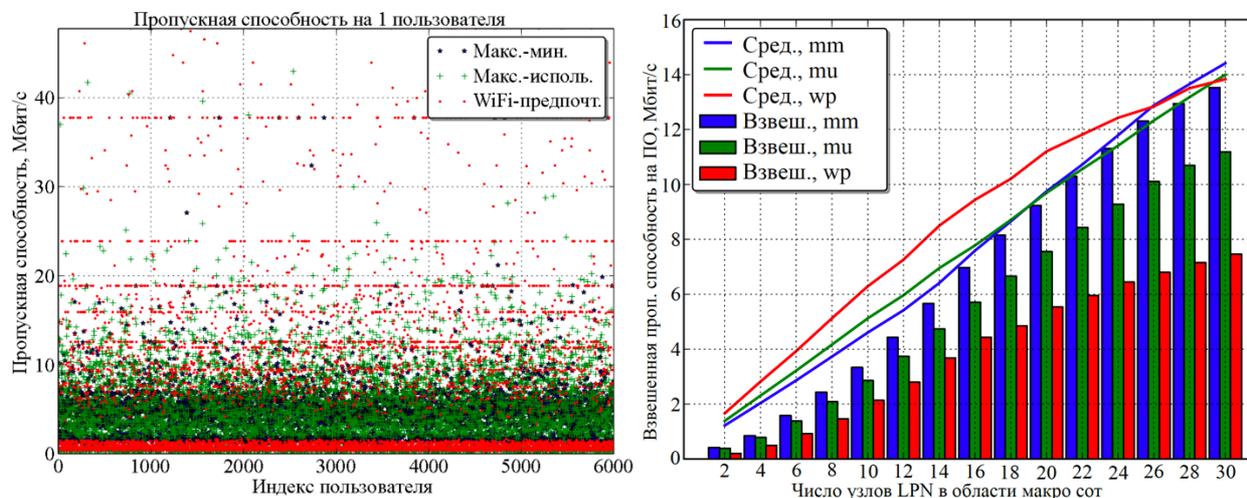


Рисунок 2 – Сравнение производительности при различных схемах распределения ресурсов

Таким образом, управление ресурсами H-CRAN с менеджером CRRM эффективнее, чем запрашиваемая справедливость или требуемая производительность. Система имеет более высокие значения справедливости и производительности с увеличением доступных сетей RAN, но «пико плюс макро» более выгодно, чем «WiFi плюс макро», хотя использование полосы пропускания в 20 МГц для WiFi должно было бы иметь преимущество по сравнению с 10 МГц пико сотового канала LTE.

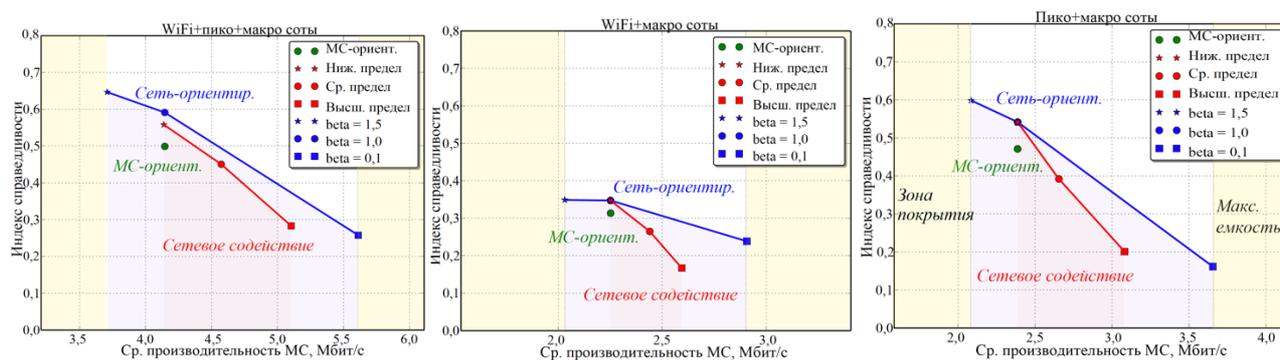


Рисунок 3 – Сравнение различных сценариев функционирования H-CRAN

В разделе 2 предложена новая методология распределения ресурсов в гетерогенных сетях, отличающаяся комплексным анализом различных технологий радиодоступа. Также предложена классификация гетерогенных сетей с учетом предложенной методологии.

Методология представлена в форме простого набора правил, т.е. в виде элементарных блоков, которые могут быть скомбинированы для построения требуемой системной модели и обеспечения соответствующих решений.

Основа структуры предлагаемой методологии, а также промежуточные и связанные с ними результаты представлены на рисунке 4. Как видно, существует дифференциация между пространственной единицей (Space Unit, SU), которая взаимоувязана с пользователем и созданной инфраструктурой (на рисунке слева), и временной единицей (Time Unit, TU), относящейся к появлению пользователей, их обслуживанию и уходу из системы (на рисунке справа). Обе единицы содержат несколько последовательных блоков, где для каждого блока имеется несколько альтернативных решений для выбора.

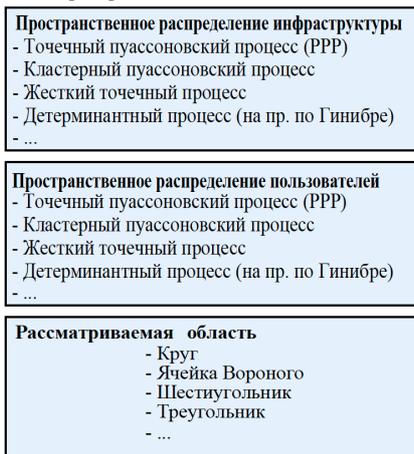
Основа структуры процесса базируется на соответствующем выборе временной единицы TU. Комбинируя выходные распределения от пространственной единицы SU со структурой процессов во временной единице TU, можно получить формулировку задачи теории очередей с вероятностями перехода, которые нетрудно рассчитать. В зависимости от сложности обеих компонент (выражений для переходных вероятностей и структуры процесса), результаты могут быть получены в численной или в замкнутой форме.

Поскольку предложенная методология предназначена, в первую очередь, для гетерогенных сетей, в диссертации разработана классификация этих сетей в соответствии с предложенным представлением.

Рассмотрена прежде всего одна базовая станция, расположенная в центре макросоты и собирающая всю необходимую для управления информацию с целью обеспечения сетевой поддержки посредством механизмов контроля доступа в сеть. Кроме того, для каждого уровня в такой гетерогенной сети будем проводить дифференциацию между тремя основными компонентами, которые изначально определяются соответствующими математическими конструкциями:

- интерференцией;
- управлением мощностью/распределением ресурсов;
- использованием ресурсов.

Характеризация пространственных компонентов



Характеризация временных компонентов

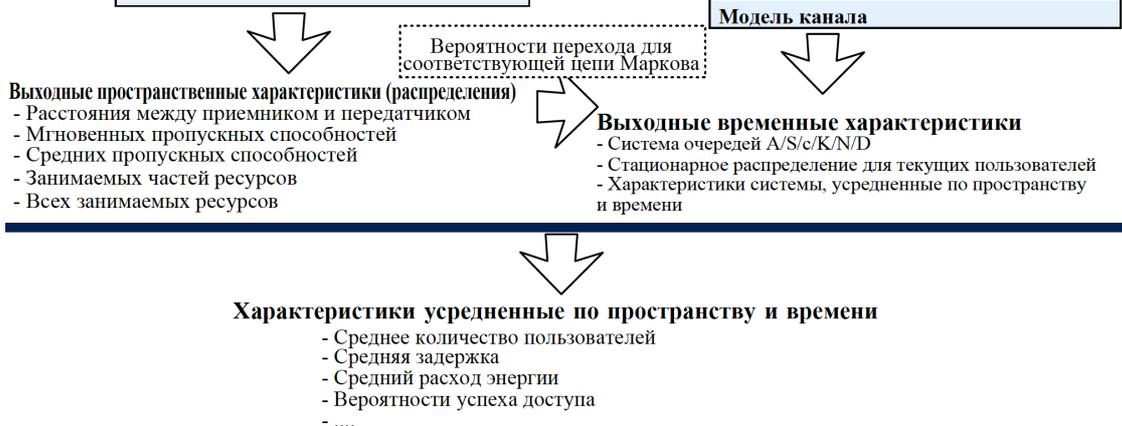
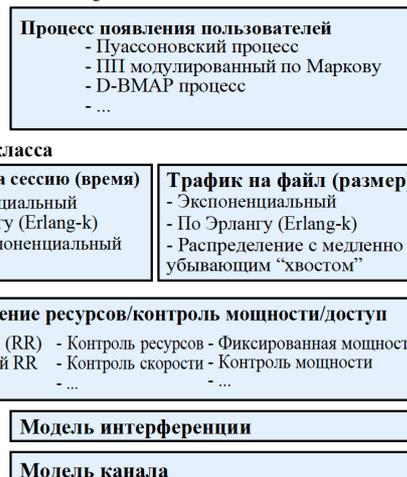


Рисунок 4 – Компоненты предложенной методологии

Разделим структуры гетерогенных сетей на три типа:

- тип I «макро». Ресурсы распределяются между несколькими линиями, влияние интерференции может быть нивелировано благодаря технологическим особенностям, таким как координация, частотное планирование, направленное излучение, а также другим современным и перспективным техническим решениям;
- тип II «D2D». Ресурсы эксклюзивно принадлежат одной линии, но интерференцию следует принимать во внимание;
- тип III «малая сота». Ресурсы распределяются между несколькими линиями и во внимание должна приниматься интерференция со стороны близлежащих сот.

Типы гетерогенных сетей пронумерованы в соответствии с их возрастающей сложностью и представлены на рисунке 5. Далее в разделе предлагается новая архитектура гетерогенной сети совместимая с 3GPP.



Рисунок 5 – Типы гетерогенных сетей

Целью предлагаемых усовершенствований системы для гетерогенных сетей является улучшение управления не-3GPP потоками данных в рамках пакетного ядра сети EPS. Поскольку это выходит за рамки домашнего eNodeB, называемого HeNB (Home eNodeB), местного доступа к IP (Local IP Access, LIPA), а также и за рамки функции доверенного WiFi, для интерфейсов WiFi и EPS, потребуется новый модуль, который маскирует различия между WiFi точкой доступа и фактическим eNodeB в направлении пользовательского оборудования, а также ядра сети, и который обеспечивает всю необходимую сигнализацию на всех соответствующих интерфейсах. Значительно расширяя существующие функциональные возможности HeNB-GW, предлагаемый в работе «Шлюз входа в сеть доступа» AAGW (Alien Access GateWay) может рассматриваться как часть функционала малых сот или сегментов WiFi на пути к действительно интегрированным системам LTE/WiFi.

Шлюз AAGW действует как прозрачный прокси-сервер на канальном уровне, где сотовая сторона выполняет все характерные протоколы, такие как SCTP, для связи с другими базовыми станциями и MME, в то время как не-3GPP сторона доступа использует WiFi непосредственно для передачи всех пакетов, которые обычно передаются через U-интерфейс между eNodeB и UE (наиболее важно, что RRC-пакеты будут необходимы для передачи). На стороне пользовательского оборудования оба интерфейса WiFi и туннельный связаны с верхними уровнями стека протоколов сотовой сети, который теперь может открыть полную функциональность ядра сети EPS для шлюза PDN через физический PHY и MAC уровни WiFi. Помимо шлюза AAGW, никаких других изменений в архитектуре 3GPP не требуется, так как остальная часть

сети может с уверенностью предполагать, что новый объект WiFi является еще одним eNodeB.

В результате создания AAGW в малых сотах и на точках доступа WiFi AP, весь не-3GPP трафик поступает до обслуживающего шлюза, маскируя точку входа как другой вид eNodeB. Фактически, совместно расположенная базовая станция LTE-WiFi теперь будет функционировать так, как если бы это были две отдельные соты; все, что ей необходимо для функционирования – внутренняя сеть оператора (такая, что интерфейсы S1 и X2 с обслуживающими шлюзами и другими eNodeB могут быть активированы). Таким образом, развертывание совмещенных базовых станций будет существенно упрощено, поскольку эти базовые станции больше не нуждаются в отдельном доступе к сети Интернет, как показано на рисунке 6. Далее в разделе разрабатывается схема управления мощностью, которая максимизирует энергоэффективность мобильного устройства при удовлетворении требуемой скорости передачи данных.

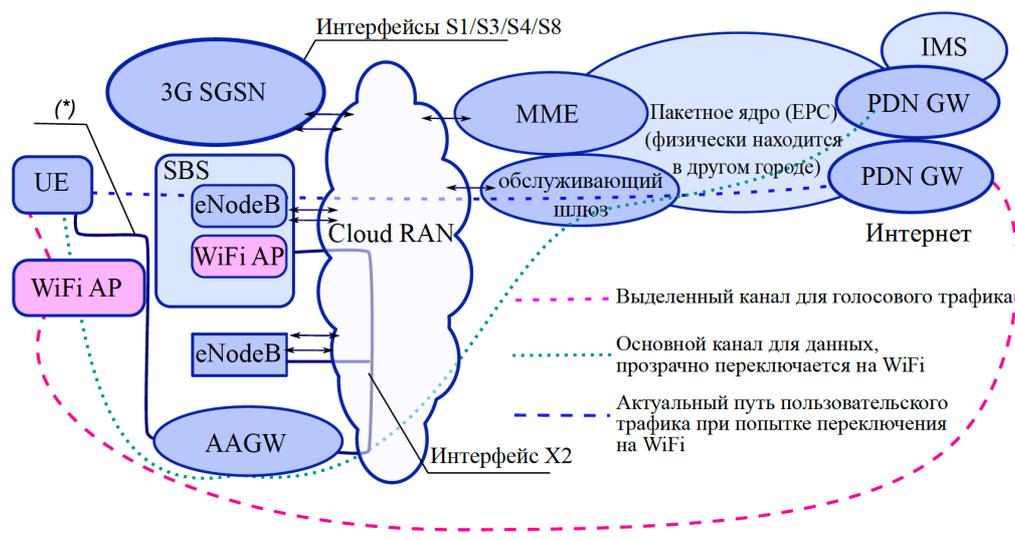


Рисунок 6 – Высокоуровневая архитектура и результирующие потоки данных для гетерогенных сетей для случая LTE/WiFi

Основная цель схемы заключается в исследовании потенциала эффективного распределения мощности передачи при функционировании мобильного устройства с несколькими радиointерфейсами в гетерогенных беспроводных сетях. Задача максимизации энергоэффективности формализована в виде

$$\max_{\{r_i\}_{i=1}^K} \eta(\mathbf{r}) = \max_{\{r_i\}_{i=1}^K} \frac{\sum_{i=1}^K r_i}{\sum_{i=1}^K p_i(r_i) + p_c}, \quad (1)$$

где

$$\eta(\mathbf{r}) = \eta(r_1, \dots, r_K) = \frac{r}{p} = \frac{\sum_{i=1}^K r_i}{\sum_{i=1}^K p_i(r_i) + p_c} \quad (2)$$

это энергоэффективность мобильного устройства, r_i и p_i – скорость передачи данных и мощность в канале i и

$$p_c = \sum_{i=1}^K p_i^c.$$

Следовательно, полная энергоэффективная скорость передачи данных следует из оптимального вектора отдельных скоростей передачи данных по каждому каналу

$$\mathbf{r}^* = \arg \max_{\{r_i\}_{i=1}^K} \eta(\mathbf{r}). \quad (3)$$

Задача оптимизации решается при помощи подхода Каруша-Куна-Таккера путем составления соответствующей системы уравнений. С ее помощью находятся стационарные точки целевой функции для задачи без ограничений, и далее решается поставленная задача при заданных ограничениях.

Далее приводятся численные результаты для частного случая при количестве радиотехнологий доступа $K = 2$. На рисунке 7 представлены взаимозависимости скорости передачи устройства, мощности передачи и энергоэффективности для различных расстояний до базовой станции для соответствующих радиотехнологий.

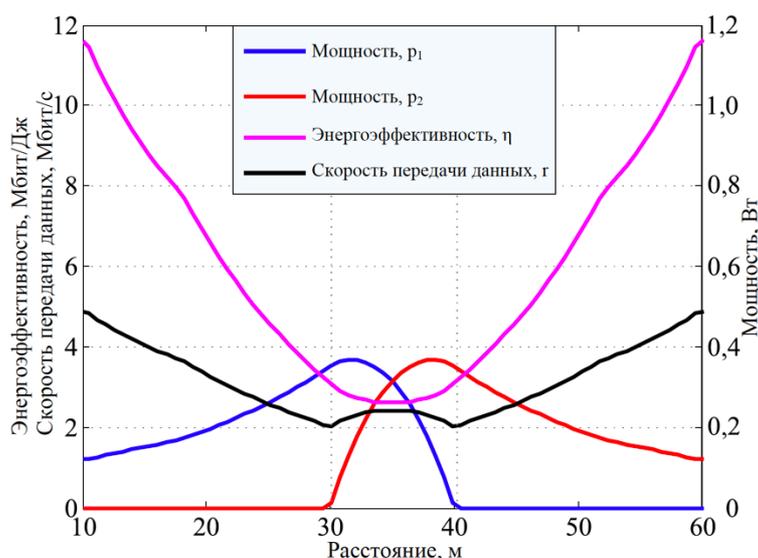


Рисунок 7 – Производительность для двух радиотехнологий доступа

Затем рассматривается более сложный сценарий, когда количество

радиотехнологий доступа равно трем. Приводятся численные результаты, представленные на рисунках 8, 9 и 10. Подробный анализ численных результатов, проведенный в данном разделе, показывает, что предлагаемое решение устанавливает области, в которых две или более радиотехнологии работают совместно, что приводит к энергоэффективной работе по сравнению с другими методами управления мощностью предложенными ранее.

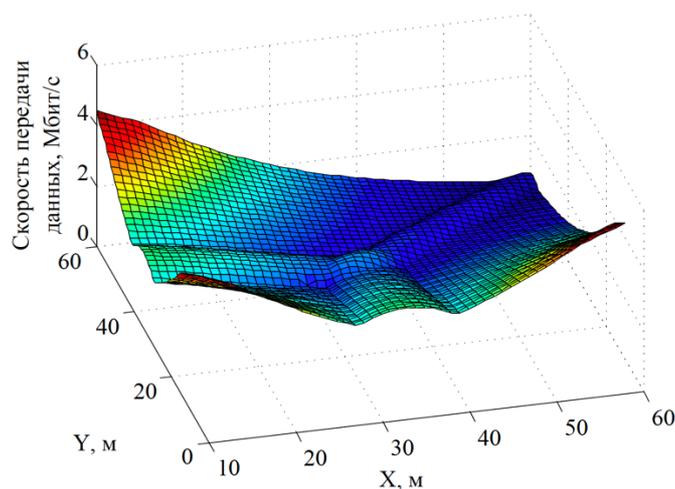


Рисунок 8 – Пропускная способность для трех радиотехнологий доступа

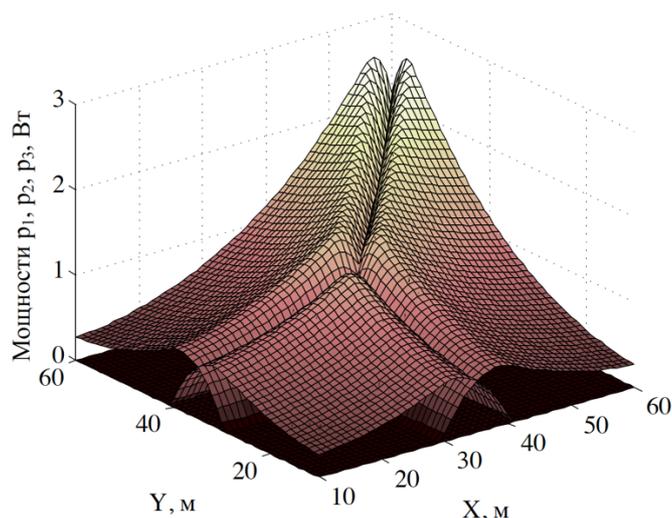


Рисунок 9 – Мощность передачи для трех радиотехнологий доступа

Третий раздел посвящен вопросам клиентской ретрансляции, без анализа которой в дальнейшем не представляется возможным обосновано перейти к исследованию сетей D2D, одной из основ построения гетерогенных сетей.

В разделе предложена схема клиентской ретрансляции для улучшения показателей задержки и энергетической эффективности для граничных ячеек M2M

устройств в условиях плохих линий связи. Предложенный аналитический подход дает существенный выигрыш в пропускной способности, что было подтверждено имитационным моделированием.

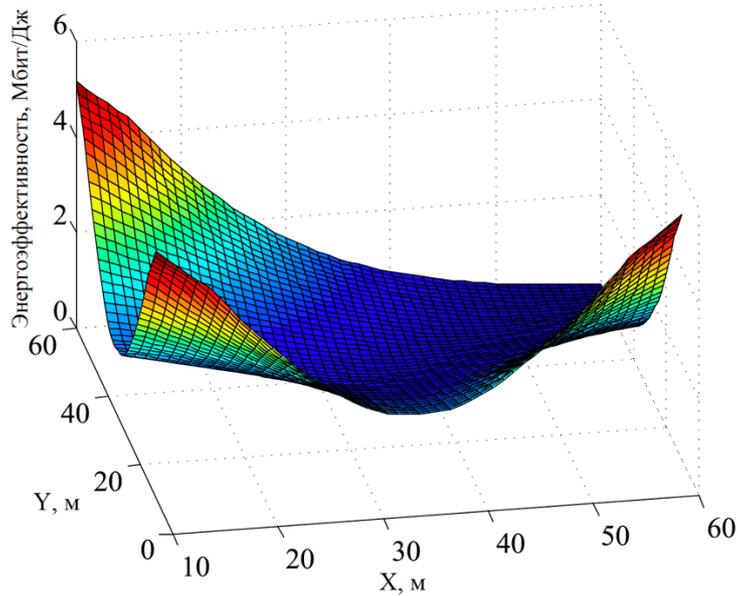


Рисунок 10 – Энергоэффективность для трех радиотехнологий доступа

Сформулирована математическая модель для системы как без, так и со схемой клиентской ретрансляции, позволяющая проводить оценку производительности клиентской ретрансляции, которая основывается на понятии длительности обслуживания пакета. Предполагается, что система состоит из источника A , ретранслятора R и приемника B . Далее рассмотрены два случая, при пустой и непустой очереди ретранслятора R . Получено выражение для аппроксимации средней задержки пакета в передающем узле в следующем виде:

$$\begin{aligned} \delta_A^* \cong & \frac{\rho_{AR}^*}{\lambda_A} + \frac{\lambda_A}{2(1-\rho_{AR}^*)(1-0.5\gamma_A^*)^2} \left[X \cdot \frac{2-p_{CB}(1-0.5\gamma_A^*)}{p_{CB}^3} - Y \cdot \frac{2-p_A(1-0.5\gamma_A^*)}{p_A^3} \right] - \\ & - \frac{\lambda_A X}{2p_{CB}(1-\rho_{AR}^*)} \cdot \left[\frac{2N_A}{p_{CB}(1-0.5\gamma_A^*)} + \frac{2-p_{CB}(1-0.5\gamma_A^*)}{p_{CB}^2(1-0.5\gamma_A^*)^2} \right] \times \\ & \times (1 - p_{CB}(1 - 0.5\gamma_A^*))^{N_A} + \\ & + \frac{\lambda_A Y}{2p_A(1-\rho_{AR}^*)} \cdot \left[\frac{2N_A}{p_A(1-0.5\gamma_A^*)} + \frac{2-p_A(1-0.5\gamma_A^*)}{p_A^2(1-0.5\gamma_A^*)^2} \right] (1 - p_A(1 - 0.5\gamma_A^*))^{N_A}. \end{aligned} \quad (4)$$

Также аналитически получен средний расход энергии передающего узла в виде

$$\varepsilon_A^* = P_{TX}\eta_A^*\tau_{A0}^* + P_I(1 - \eta_A^*\tau_{A0}^*), \quad (5)$$

а средние энергозатраты для ретранслятора R могут быть определены как

$$\varepsilon_R^* = P_{TX} \left(\eta_R^* \tau_{R0} + \eta_A^* \cdot \frac{1 - \frac{p_{AB} \tau_{A0}^*}{1 - (1 - p_{AB})^{N_A}}}{p_{CB} - p_{AB}} \right) + \quad (6)$$

$$+ P_{RX} \left(1 - \eta_R^* \tau_{R0} - \eta_A^* \cdot \frac{1 - \frac{p_{AB} \tau_{A0}^*}{1 - (1 - p_{AB})^{N_A}}}{p_{CB} - p_{AB}} \right),$$

где P_{RX} — средняя мощность, затрачиваемая узлом при приеме пакета.

Далее были рассмотрены беспроводные сотовые сети в условиях распределенного управления кооперативными коммуникациями посредством облака клиентской ретрансляции. Основная цель такой облачной структуры состоит в увеличении пропускной способности путем поддержки мобильных клиентов, находящихся на границе покрытия с плохими каналами связи. Предложен протокол функционирования системы клиентской ретрансляции. Определены основные характеристики производительности для предложенной структуры, такие как пропускная способность, задержки и энергетическая эффективность. Получены аналитические выражения в замкнутом виде и верифицированы путем моделирования системного уровня. Результаты показали существенный выигрыш от применения облака ретрансляции, который выражается в восстановлении пропускной способности для мобильных клиентов с деградировавшими беспроводными линиями. На рисунках 11 и 12 графически представлены основные результаты.

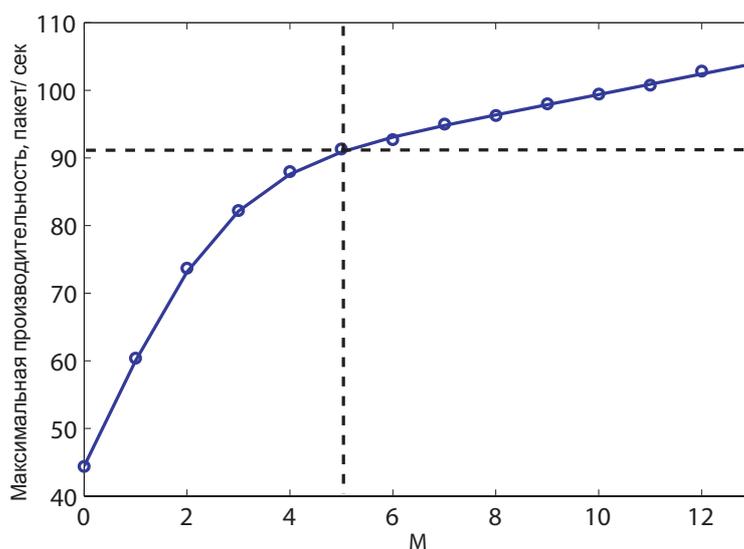


Рисунок 11 – Пропускная способность в зависимости от количества узлов в облаке ретрансляции

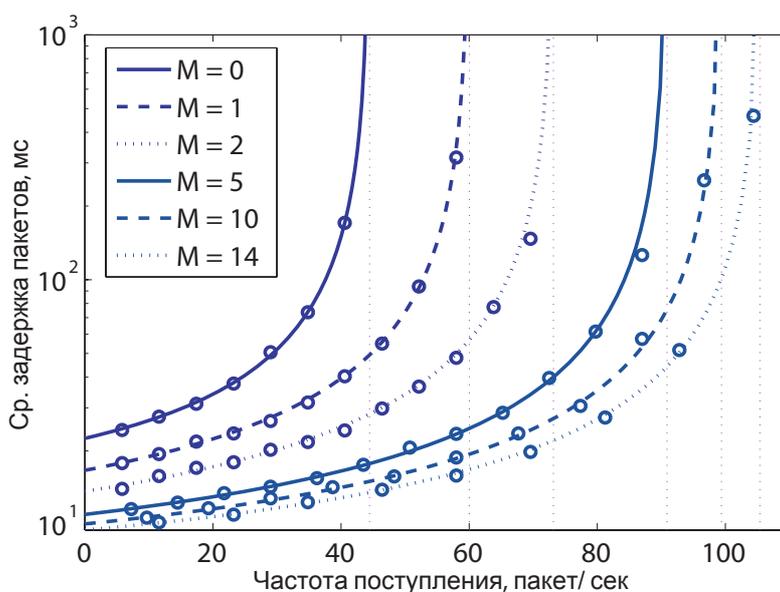


Рисунок 12 – Средняя задержка пакета в зависимости от интенсивности поступления пакетов для различных значений количества узлов в облаке ретрансляции

В разделе 4 исследуются сети D2D. В частности, в этом разделе предлагается анализ влияния интерференции в гетерогенном облаке доступа на базовые параметры функционирования D2D. Далее рассматривается интеграция D2D на базе технологии WiFi Direct в предложенную ранее в разделе 2 новую архитектуру гетерогенной сети с использованием шлюза AAGW. Производится оценка предложенной архитектуры гетерогенной сети с интегрированным WiFi Direct посредством имитационного моделирования. Завершается раздел описанием технологических работ по практической реализации разработанной архитектуры с учетом ранее определенного функционала. Также приведены результаты измерений на базе практической реализации, развернутой на тестовой сети LTE.

В начале раздела предложена методология анализа интерференции в гетерогенных сетях, в результате применения которой есть возможность понимания влияния интерференции на характеристики функционирования гетерогенных сетей. В частности, получены зависимости между плотностью передающих устройств, размещенных на некоторой плоскости и интерференционным расстоянием для взаимодействующих устройств D2D. Также получена зависимость математического ожидания и среднеквадратического отклонения величины отношения сигнала к интерференции (Signal to Interference Ratio, SIR) от параметра распределения дистанции до интерферирующего передатчика. Анализ построен для случая сосуществования сигналов от двух и более базовых станций различных

радиотехнологий доступа. В том числе предложена и проанализирована системная модель, представленная на рисунке 13. Для этой модели показано, что для заданного радиуса r плотность распределения расстояния между случайной точкой внутри окружности и фиксированной точкой за ее пределами на расстоянии $r_1 + r$ от ее центра определяется формулой

$$g(\rho) = \frac{2\rho}{\pi r^2} \arccos \left(\frac{r_1}{\rho} + \frac{\rho^2 - r_1^2}{2\rho(r + r_1)} \right), \quad (7)$$

где $r_1 \leq \rho \leq r_1 + 2r$. Далее получено распределение расстояния между двумя точками с учетом того, что r_1 является случайной величиной с плотностью распределения $f_{r_1}(x)$, где $x \geq r$:

$$g_2(\rho) = \int_r^\infty \frac{2\rho}{\pi r^2} \arccos \left(\frac{x}{\rho} + \frac{\rho^2 - x^2}{2\rho(r + x)} \right) f_{r_1}(x) dx. \quad (8)$$

Поставленная задача, заданная в общих предположениях, фактически сводится к нахождению распределения случайной длины одной из сторон случайного треугольника, заданного распределениями длин двух других сторон и угла между ними. Общий подход к решению этой задачи основан на последовательном применении известного метода преобразования случайных величин и решение продемонстрировано в данном разделе. Далее, в связи с тем, что величины D и L взаимосвязаны и представляют собой плотности распределения d и l соответственно, для получения SIR необходимо получить их совместное распределение, которое имеет следующий вид

$$\begin{aligned} W_{L,D}(y_1, y_2) &= \\ &= \sum_{j=1,2} \int_{\mathbf{Y}_{3,j}} \frac{f_L(y_1) f_U(\phi_j(y_1, y_2, y_3)) f_\gamma(y_3) y_2}{\sqrt{y_2^2 - y_1^2 + y_1^2 \cos^2(y_3)}} dy_3, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{cases} y_1 = f(x_1, x_2, x_3) = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 - 2x_1x_2 \cos x_3}, \\ y_2 = x_2, \\ y_3 = x_3. \end{cases}$$

В качестве примера применения предложенной модели приведем типичный случай взаимодействия двух устройств в формате D2D. Так расположение передающих устройств определяются согласно пространственному распределению Пуассона.

Соответствующие передающим устройствам приемники равномерно расположены внутри круга единичного радиуса с центром в точке расположения передатчика.

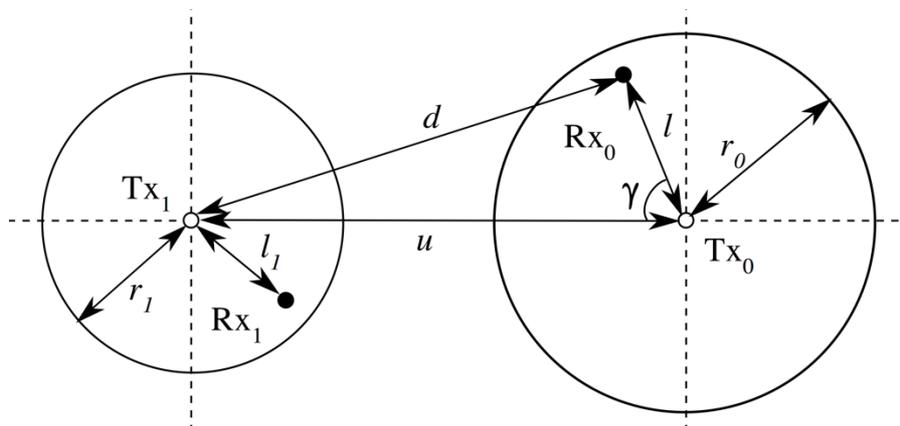


Рисунок 13 – Системная модель для анализа интерференции в гетерогенных сетях

Интерферирующий передатчик расположен за пределами указанного круга, при этом являясь ближайшей точкой пространственного пуассоновского процесса к рассматриваемому передатчику. Результирующая форма полученного распределения в зависимости от параметра плотности передающих устройств на плоскости показана на рисунке 14. Расстояние на данном графике приводится в условных единицах, нормированных на радиус круга как r_0 тем самым обобщая полученный результат.

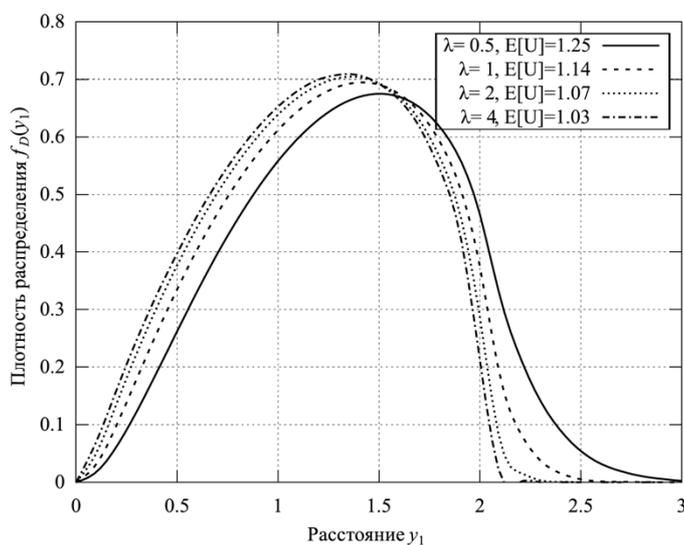


Рисунок 14 – Плотность передающих устройств в зависимости от интерференционного расстояния для взаимодействующих устройств D2D

В свою очередь на рисунке 15 приведены математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение величины SIR от параметра распределения

дистанции до интерферирующего передатчика. Таким образом, получены базовые соотношения, определяющие влияние интерференции на работу сетей D2D.

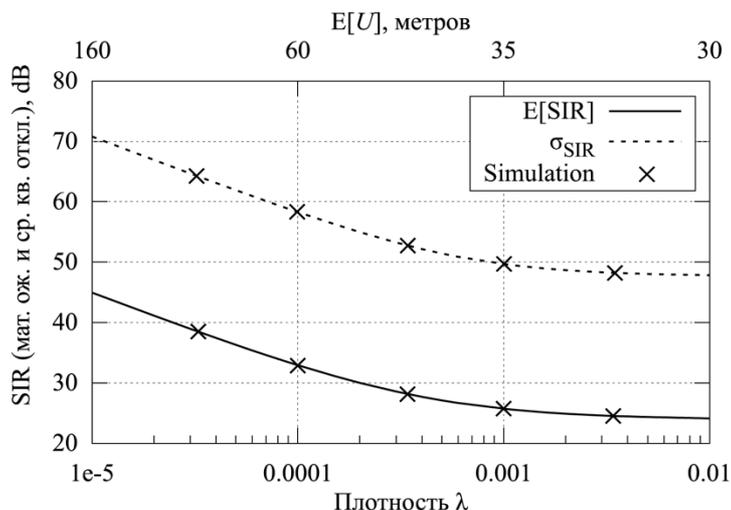


Рисунок 15 – Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение величины SIR от параметра распределения дистанции до интерферирующего передатчика

Предложенная в диссертационной работе новая архитектура сети с использованием D2D может быть сопоставлена с объектами архитектуры 3GPP, с единственным дополнительным объектом – сервером D2D, находящимся в EPC фрагменте сети. Такое размещение позволяет серверу D2D связываться с центром местоположения (Serving Mobile Location Centre, SMLC), чтобы позиционировать пользовательское оборудование, а также эффективно взаимодействовать с серверами приложений внешних провайдеров и операторов.

Для выгрузки трафика в сеть D2D далее используется технология WiFi Direct. Исследование D2D с сетевой поддержкой проведено с помощью имитационного моделирования. С этой целью под руководством автора была разработана специализированная система имитационного моделирования WINTERsim, хорошо зарекомендовавшая себя как при исследованиях в диссертационной работе, так и при иных исследованиях в области гетерогенных сетей и систем.

Затем в разделе проводится интеграция D2D в новую архитектуру гетерогенной сети с использованием предложенного в диссертации шлюза входа в сеть доступа AAGW, который обеспечивает значительное сокращение сквозных задержек вследствие того, что трафик не нуждается в транзите на удаленный шлюз PDN, и

существенное сокращение затрат на развертывание малых сот, поскольку не требуется обеспечивать ни операторскую магистральную сеть, ни доступ в Интернет.

В разделе 5 диссертационной работы предложены и исследованы модели и методы доступа устройств M2M к ресурсам систем как IEEE 802.11ah, так и LTE, учитывающие специфику обслуживания данных малого объема для организации эффективного обслуживания трафика M2M в IEEE 802.11ah и LTE.

В разделе разрабатывается аналитическая модель для протокола IEEE 802.11ah, позволяющего обеспечить передачу данных высокого числа узлов на некотором пространстве. При этом все узлы такой сети характеризуются передачей одного сообщения малой длины за длительный промежуток времени. Предложенная модель отличается высокой скоростью работы по сравнению с имитационным моделированием при получении результатов аналогичной точности.

Приводятся основные допущения модели с точки зрения аппроксимации реальной системы. Пусть в сети присутствуют U узлов. В системе присутствует одна базовая станция (БС), которая принимает пакеты от всех узлов. БС не производит собственный трафик, в то время как узлы генерируют пакеты согласно входному потоку Бернулли. Вводится предположение о синхронности системы связи и всем узлам доступно точное время, разделенное на кадры, где каждому узлу известны их границы. Минимальным размером кадра взят интервал времени между потенциальными интервалами генерациями пакета. Подразумевается, что все узлы относятся к одному классу обслуживания, т.е. вероятность генерации пакета и параметры доступа к среде едины для всех узлов.

Разработанная модель учитывает определенное количество потенциальных появлений нового пакета в течение длительности соответствующего события (успешная передача, конфликт или пустой слот), т.е. время функционирования системы разделяется на как можно более короткие участки времени t_g , согласно длительностям событий. Например, для успешного временного слота это значение можно определить как $L_s = t_s/t_g$, а промежуток времени t_g выбран таким образом, чтобы все значения $L_s/c/e$ оказались целочисленными.

Рассматриваемую модель можно аппроксимировать как случайный процесс с дискретным временем, где узел может сгенерировать пакет в каждый интервал времени t_g с вероятностью σ согласно закону Бернулли. После формирования пакета и в случае

пустого буфера, узел произведет немедленную попытку передачи в канал. В то же время в системе уже может находиться некоторое количество пользователей i , ожидающих обслуживания с готовыми пакетами на передачу. Ожидающие обслуживания пользователи будут пытаться повторно передавать пакеты с вероятностью p , основанной на текущих параметрах алгоритма случайного множественного доступа в канал для каждого пользователя, а именно – алгоритма двоичной экспоненциальной отсрочки.

Далее приводится математическая модель для анализа поведения канала множественного доступа IEEE 802.11ah. Граф переходов состояний представлен на рисунке 16, где первым параметром состояния является количество пользователей, ожидающих передачу, а вторым – текущее событие системы, т.е. конфликт, успех или пустой слот. В первую очередь, формируется матрица переходных вероятностей и соответствующий вектор стационарного распределения. На основании данных составляющих, рассчитываются основные параметры стационарных состояний системы, такие как, например, среднее число ожидающих обслуживания пользователей или средние число пакетов в системе готовых для передачи. Основными метриками оценки производительности сети выбраны полезная пропускная способность канала (бит сообщения без учета заголовков в секунду) и энергетические затраты устройств на передачу. Здесь задержка передачи пакета не рассматривается как основная метрика, т.к. она может играть незначительную роль для услуг M2M, но, в то же время, ее значение может быть преобразовано в энергоэффективность, которая, в свою очередь, является важной характеристикой для автономных устройств.

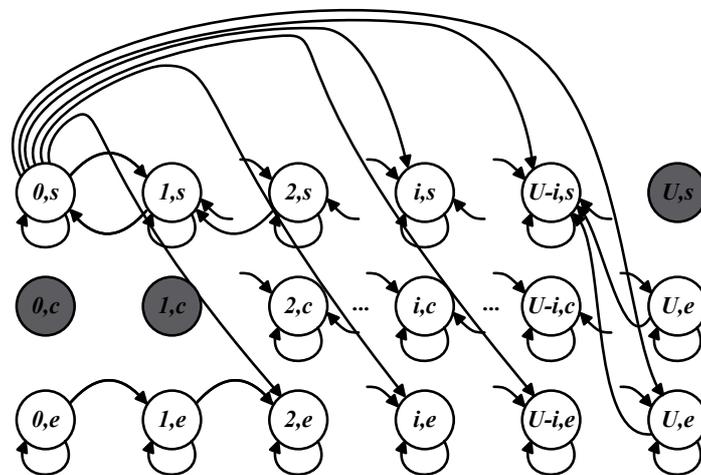


Рисунок 16 – Граф переходов состояний канала множественного доступа

IEEE 802.11ah

Далее в разделе приводится последовательность шагов для аналитического вывода основных метрик системы, а именно: стационарное распределение вероятностей по вложенным точкам; число активных пользователей в системе в среднем и в среднем на событие; среднее число пакетов, переданных за каждый минимальный интервал времени t_g ; пропускная способность системы; и энергопотребление.

Аналитические результаты были получены для 6000 автономных узлов при фиксированном параметре формирования пакета – в среднем один пакет за 10 секунд. Результаты представлены на рисунке 17. Расчет имитационного моделирования приводится для случаев, когда количество узлов ниже 1500, т.к. время моделирования каждой последующей группы узлов экспоненциально возрастает.

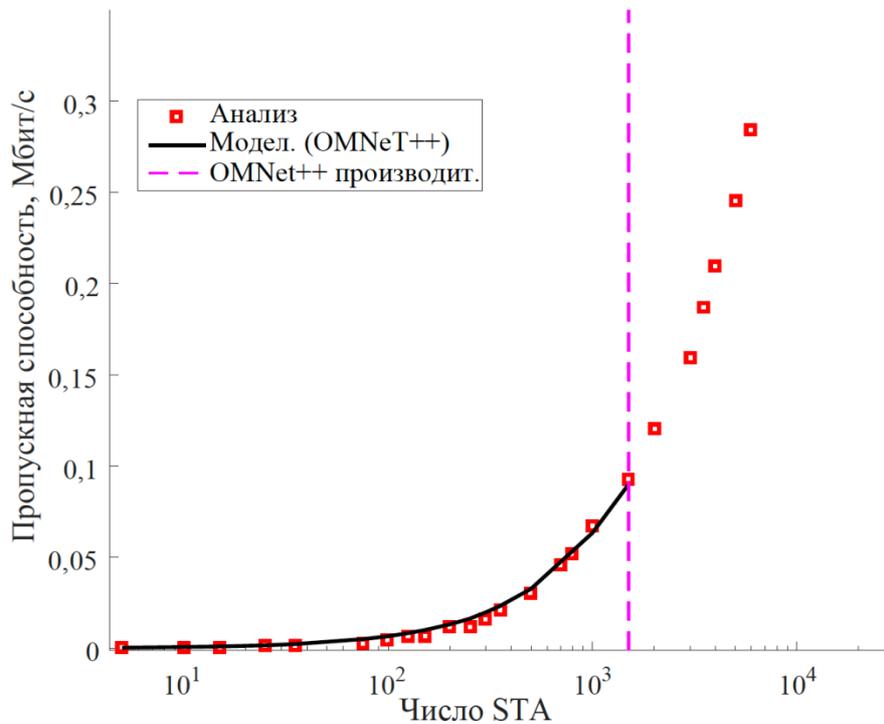


Рисунок 17 – IEEE 802.11ah зависимость пропускной способности от числа пользователей

Также, был произведен анализ энергопотребления системы. Важно отметить, что с ростом числа пользователей в системе прослеживается тенденция к расходимости результатов энергопотребления, где при 100 узлах погрешность аналитической модели составляет 0,24%, против 8,92% при 1500 узлах. Эта особенность обусловлена нестабильной работой реальной системы, где количество конфликтов зависит от

случайных факторов, в то время как аналитическая модель построена на принципах оценки стационарного распределения системы.

Далее в разделе предложен и детально исследован эффективный метод передачи малых данных, который может быть использован как альтернатива традиционной сигнализации, существенно увеличивая при этом производительность для сетей M2M. В разделе предложен новый подход к оценке механизмов доступа данных для M2M и эффективный метод с учетом специфики данных, названный ранее в работах автора COBALT (Contention-BAsed LTE Transmission).

Основная идея предлагаемого конкурентного доступа для систем LTE, COBALT, состоит в передаче пакетов малых данных непосредственно посредством PUSCH вместо использования ресурсов времени и мощности сигнализации PUCCH/PRACH. Идея сама по себе в оригинальном виде была предложена в контексте уменьшения задержек в LTE. В диссертационной работе предлагается использовать механизм COBALT для сценария M2M, когда число устройств очень велико, а трафик нерегулярен и мал. При этом ожидается, что в подобных условиях предложенная схема будет допускать малые задержки и, что даже более важно, уменьшит потребление энергии на сигнализацию для небольших M2M устройств, питание которых осуществляется от батареи.

На рисунках 18 и 19 представлены соответственно потребление мощности и функции распределения задержки для различных методов доступа.

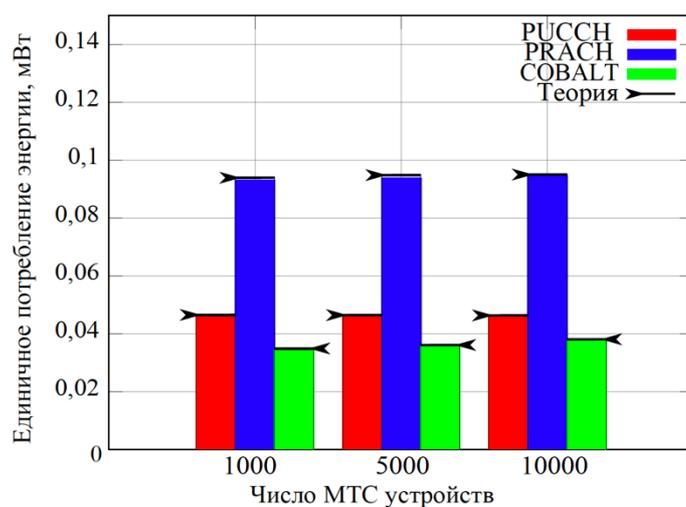


Рисунок 18 – Потребление мощности для различных методов доступа

Как видно, потребление энергии при процедуре COBALT существенно ниже, чем при использовании схемы на базе PRACH, особенно при небольших нагрузках.

Стоит отметить, что энергетическая эффективность COBALT немного лучше, чем доступа, основанного на PUSCH, в котором не предусмотрено процедуры конкуренции за канал.

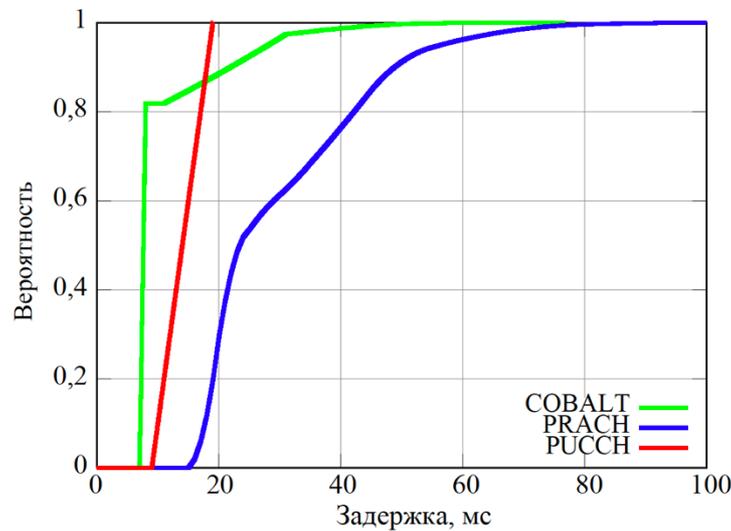


Рисунок 19 – Функция распределения задержки для различных типов каналов

Метод доступа для данных COBALT обладает существенно меньшим значением задержки пакетов. Несмотря на то, что большинство видов трафика M2M относится к трафику, толерантному к задержкам, есть достаточно много ситуаций, когда задержка является критичной для качества восприятия пользователем (например, аварийные сообщения и приложения для транспорта), а предложенная в диссертационной работе схема COBALT улучшает задержку по сравнению со схемой PUSCH для почти 85% случаев.

В последнем шестом разделе диссертационной работы основное внимание уделяется новейшей технологии передачи трафика Интернета Вещей, разработанной 3GPP и названной узкополосный IoT (Narrowband IoT, NB-IoT), являющейся еще одной технологией доставки данных в гетерогенном облаке радиотехнологий доступа. В частности, проводится анализ производительности технологии NB-IoT на базе разработанной модели и далее разрабатывается 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.

В начале раздела проведен анализ производительности технологии NB-IoT с точки зрения вероятностных характеристик обслуживания, таких как вероятность потери сообщения, распределение и средняя задержка сообщения в системе.

Представленная модель позволяет определить диапазоны нагрузок, при которых выполняются заданные параметры качества обслуживания устройств. Приведены численные результаты для сот радиусов 10 и 30 км.

В работе предполагается, что зона обслуживания базовой станции имеет форму окружности с радиусом R с равномерно распределенными в ней N устройствами. Плотность датчиков на 1 кв. км определяется формулой $\sigma = N/\pi R^2$. Интенсивность поступления заявки от одного устройства обозначена как λ_t , соответственно $\lambda_l = \lambda_t \Delta$ – это интенсивность поступления сообщений за время одного слота, где Δ – длительность одного кадра LTE. Датчики отправляют сообщение размером 100 бит. Таким образом, для передачи любого сообщения требуется один ресурсный блок NB-IoT.

Рассматривается сценарий, представленный на рисунке 20. Предполагается, что датчик NB-IoT передает данные на базовую станцию. Запрос буферизируется пока не освободится канал для передачи данных. Как только появляется возможность для передачи данных, базовая станция выделяет один канал NB-IoT датчику и тот начинает передачу данных на установленной мощности передачи. Требуемая мощность передачи $P(d)$ зависит от расстояния от датчика до базовой станции и определяется формулой $P(d) = Z d^\gamma$, где Z является константой, зависящей от частоты, а γ – экспонента затухания. Затем в разделе введена вложенная цепь Маркова по моментам завершения обслуживания, с помощью которой поведение системы определяется уравнением

$$Q(n) = \max(\min(Q(n-1) + A(n) - S(n-1), L), L), \quad (10)$$

где S обозначает количество обслуженных сообщений в слоте, при этом заявки обслуживаются пачками из не более чем K штук в момент окончания слота, а $A(n)$ – количество сообщений, поступивших в слот n . Далее принимается, что пришедшие заявки не могут моментально поступить на обслуживание в слоте, в котором они пришли, а будут обслужены только в следующем, а в случае, если в систему поступает пачка из i сообщений и при этом в системе уже находится k сообщений, так, что $k + i > L$, в очередь принимаются только $L - k$ сообщений, а оставшиеся теряются.

Далее пусть $C = (c)_{i,j}$ $i, j \in \{0, 1, \dots, L\}$ является матрицей переходных вероятностей для данной системы. Пусть далее $\vec{x}_D = (x_{D,0}, x_{D,1}, \dots, x_{D,L})$, $x_{D,i} =$

$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr \{Q(n) = i\}$ это вектор стационарных вероятностей системы, описывающий количество сообщений в системе в момент времени непосредственно после окончания обслуживания. Вектор стационарных вероятностей может быть найден путем решения системы уравнений $\vec{x}_D C = \vec{x}_D, \vec{x}_D \vec{e} = 1$, где \vec{e}_D – единичный вектор.

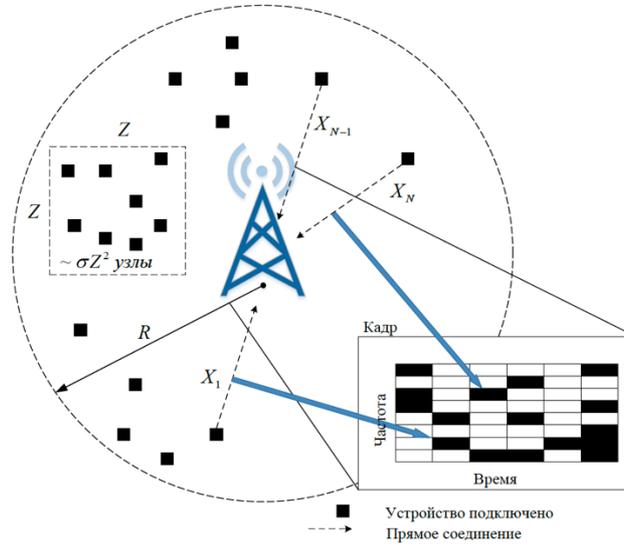


Рисунок 20 – Модель для анализа показателей производительности системы NB-IoT

В тексте раздела для описанной системы анализируются распределение вероятностей потери i сообщений, среднее значение времени задержки сообщения в системе. Показано, что количество потерянных сообщений в слоте будет вычисляться по формуле

$$f_L(i) = \frac{\sum_{k=0}^B x_{D,k} A_{K-k+i}}{\Pr\{A(n) \geq 1\}} = \frac{\sum_{k=0}^B x_{D,k} A_{K-k+i}}{1 - e^{-\lambda\Delta}}, i = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где $\Pr\{A(n) \geq 1\} = 1 - e^{-\alpha\Delta}$ – вероятность того, что в слот n поступает хотя бы одно сообщение, а A_k обозначает количество сообщений, поступивших в течение одного временного слота Δ .

Далее показано, что вероятность потери сообщения принимает вид

$$p_L = \frac{\sum_{k=0}^B \sum_{i=1}^{\infty} x_{D,k} A_{L-k+i} \frac{i}{L-k+i}}{1 - e^{-\lambda\Delta}}. \quad (12)$$

Результаты численного анализа приведены на рисунках 21 и 22 для случая сот радиусом 10 и 30 км. В результате анализа показано, что технология NB-IoT может обеспечить надежную передачу данных (вероятность потери сообщений менее 10^{-3}) для 100 подключенных датчиков на квадратный километр, каждый из которых генерирует приблизительно $\lambda_l = 1$ сообщений в минуту. Как для указанных значений,

так и для меньшего количества подключенных M2M устройств может быть обеспечена надежная связь.

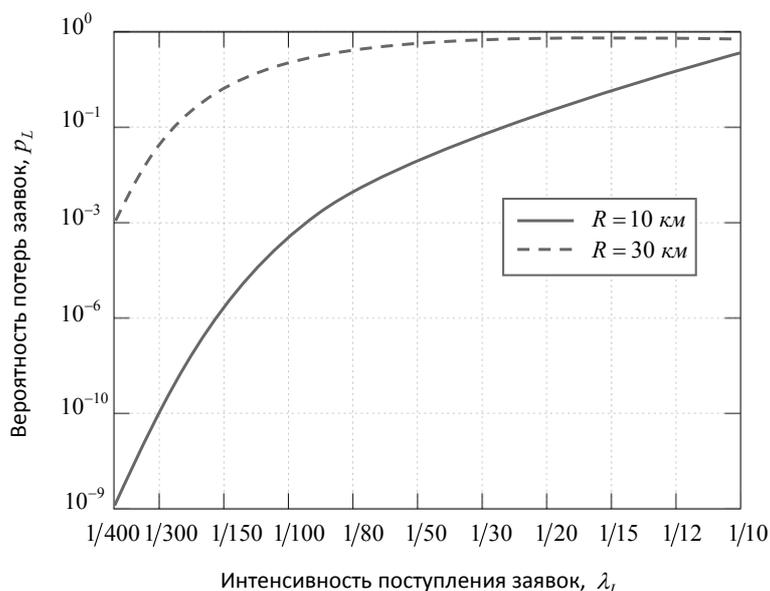


Рисунок 21 – Вероятность потери сообщения в NB-IoT

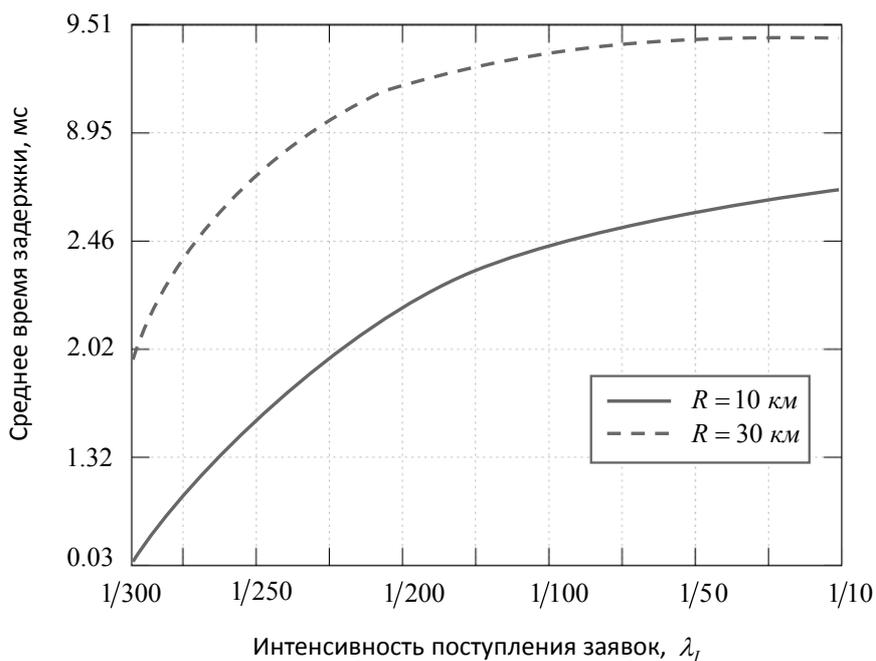


Рисунок 22 – Средняя задержка передачи сообщения в NB-IoT

Используя разработанный инструмент, в разделе проводится сравнение трех возможных стратегий распределения радиоресурсов: статической, динамической и динамической с резервированием. Аналитические результаты для сот размером 10 и 30 км показали, что динамическая стратегия с резервированием рекомендуется для будущих развертываний NB-IoT в мобильных сетях LTE, а разработанная аналитическая модель может применяться для оценки эффективности будущих

решений.

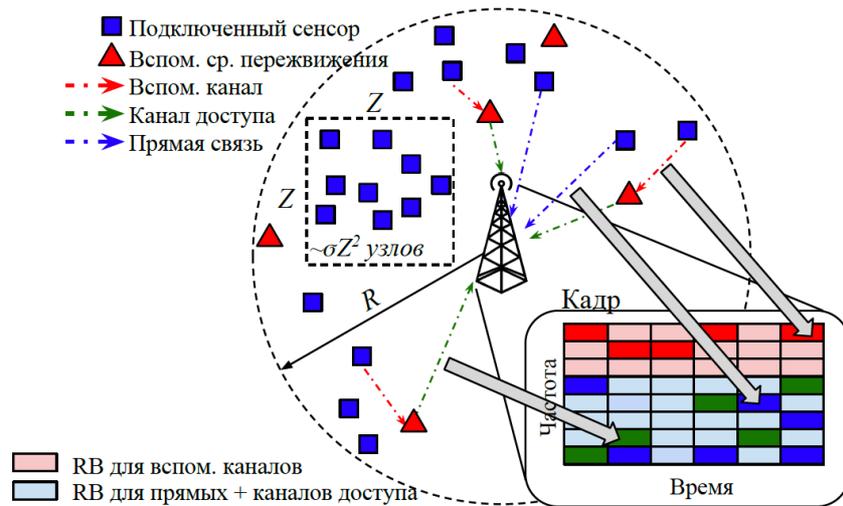


Рисунок 23 – Модель для анализа показателей производительности системы NB-IoT с клиентской ретрансляцией

Моделирование процесса доставки сообщений было проведено с использованием сети массового обслуживания (СеМО) с дискретным распределением времени, состоящей из M индивидуальных очередей. Было показано, что такая СеМО не имеет циклов и может быть проанализирована применяя метод декомпозиции, т.е. рассматривая каждую очередь отдельно. В результате исследования показано, что совокупный трафик, выходящий из всех входящих очередей M можно аппроксимировать пуассоновским процессом с интенсивностью

$$\begin{aligned} \lambda_{M+1} &= M(1 - p_L) \frac{(1 - p_{M+1})}{M} \lambda + p_{M+1} \lambda = \\ &= \lambda[(1 - p_L)(1 - p_{M+1}) + p_{M+1}], \end{aligned} \quad (13)$$

где p_L – вероятность потери сообщения для любого входящего потока. В результате общая вероятность потери сообщения равна

$$\tilde{p}_L = 1 - (1 - p_L)(1 - p_{L,M+1}), \quad (14)$$

где $p_{L,M+1}$ – вероятность потери сообщения для очереди $M + 1$. При этом плотность распределения вероятностей (ПРВ) совместного времени ожидания обеспечивается прямой сверткой ПРВ задержек, которые возникают в произвольно выбранном входящем потоке и в очереди $M + 1$.

Также в этом разделе предложена модель расчета энергии на передачу и времени жизни датчика при использовании клиентской ретрансляции. Главное различие относительно базового сценария заключается в том, что теперь датчик может

использовать подвижные БС (ретрансляторы), расположенные на ТС, для передачи определенной части своих сообщений. Для этого в известную модель вводятся переменные учета времени, когда случайно выбранный датчик отправляет свои сообщения через ретрансляционные БС и основные БС соответственно.

Численные результаты, представленные на рисунке 24 подтверждают, что применение ТС для массовых приложений позволяет существенно улучшить работу устройств IoT.

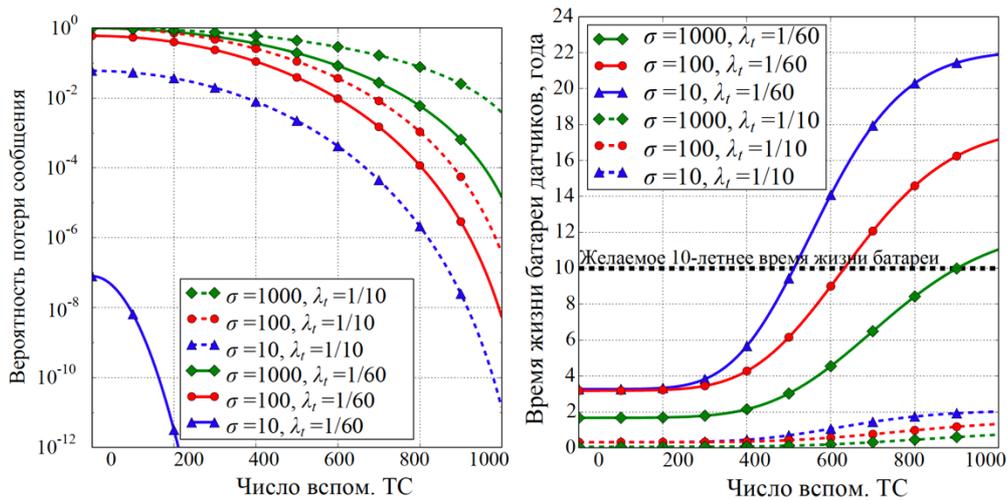


Рисунок 24 – Зависимость вероятности потери сообщения и времени жизни батареи от количества ТС в сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Разработана методология комплексного применения моделей систем теории массового обслуживания для анализа распределения ресурсов в гетерогенных сетях связи, обеспечивающая возможность получения адекватных аналитических результатов при наличии двух и более радиотехнологий у подключенного устройства.
2. Предложена классификация гетерогенных сетей, охватывающая их различные типы на системном уровне. Абстрагируясь от несущественных системных свойств, удалось сфокусировать исследования на основных примерах групп технологий доступа для гетерогенных сетей на основе предложенной классификации.

3. Предложен критерий оптимизации распределения ресурсов в гетерогенных сетях телекоммуникаций, для которого 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. При этом целевая функция дополняется весовыми коэффициентами на основе мгновенных значений спектральной эффективности. Использование критерия позволяет достичь лучшего (до 60%) значения 5% квантиля производительности соты по сравнению с известными критериями.
4. Разработана методология оптимизации производительности гетерогенных радиотехнологий доступа H-CRAN с использованием кооперативного управления 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.
5. Разработана методология эффективного распределения мощности передачи и схема управления мощностью для одновременно функционирующих двух и более радиотехнологий доступа устройства в гетерогенной сети, максимизирующая энергоэффективность мобильного устройства при удовлетворении минимальной требуемой скорости передачи пользовательских данных.
6. Предложен новый шлюз входа в сеть доступа (AAGW), который отражает функциональность решений 3GPP во WLAN радиотехнологиях доступа и наоборот, что обеспечивает значительное сокращение сквозных задержек вследствие того, что трафик не нуждается в транзите на удаленный шлюз PDN, и существенное сокращение затрат на развертывание малых сот, поскольку не требуется обеспечивать ни операторскую магистральную сеть, ни доступ в Интернет.
7. Разработан комплекс моделей и методов выгрузки трафика в гетерогенных сетях, отличающийся от известных тем, что для выгрузки трафика используется технология WiFi Direct.

8. Предложена новая технология сетевой поддержки сетей D2D и разработаны модели и методы распределения ресурсов для функционирования D2D на ее базе для сокращения общих энергозатрат в гетерогенной зоне базовой станции и увеличения надежности сетей D2D в целом.
9. Разработаны модель и метод доступа устройств M2M к ресурсам системы LTE, учитывающие специфику обслуживания данных малого объема, для организации эффективного обслуживания трафика M2M в LTE при наличии альтернативных каналов доставки данных и радиотехнологий доступа.
10. Разработаны модель и метод анализа механизмов доставки данных от M2M устройств в гетерогенных сетях 3GPP для альтернативных способов доставки различных типов данных, а также с возможностью клиентской ретрансляции.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Кучерявый, Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет // СПб.: Наука и Техника, 2004. – 336 с. – 21 / 21 п.л.
2. Кучерявый, Е.А. Самоорганизующиеся сети / А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. // СПб. : Любавич, 2011. – 312 с. – 20,62 / 12 п.л.
3. Кучерявый, Е.А. Сети связи общего пользования / Кучерявый, А.Е.; Парамонов, А.И.; Кучерявый, Е.А. Изд-во: М.: ФГУП ЦНИИС, 2008 г.; ISBN: 5-00-000831-6. – 18,5 / 10,54 п.л.

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

4. Кучерявый, Е.А. Методология распределения ресурсов в гетерогенных сетях / Кучерявый Е.А., Самуйлов К.Е. // Электросвязь. – 2018. – № 4. – С. 34-40. – 0,30 / 0,20 п.л.
5. Кучерявый, Е.А. Аналитическая модель беспроводных сетей технологии IEEE 802.11ah / Ометов А.Я., Щесняк А.С., Кучерявый Е.А. // Электросвязь. – 2018. – № 1. – С. 51-58. – 0,33 / 0,13 п.л.
6. Кучерявый, Е.А. Оценка отношения сигнал/помеха в беспроводных сетях связи терагерцового диапазона частот / Петров В.И., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. // Электросвязь. – 2017. – № 10. – С. 24-29. – 0,35 / 0,13 п.л.

7. Кучерявый Е.А. Анализ интерференции в беспроводных сетях связи терагерцового диапазона частот/ Петров В.И., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А.// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 1. С. 27-36. 0,32/ 0,11 п.л.
8. Кучерявый, Е.А. Анализ производительности беспроводной системы агрегации данных с состязанием для современных сенсорных сетей / Ометов А.Я., Андреев С.Д., Тюрликов А.М., Кучерявый Е.А. // Информатика и ее применения. – 2016. – Т. 10. – № 3. – С. 23-31. – 0,35 / 0,15 п.л.
9. Кучерявый Е.А. Анализ пропускной способности и характеристик частотного спектра в сетях связи сверхмалого радиуса действия в терагерцовом диапазоне// Боронин П.Н., Кучерявый Е.А., Молчанов Д.А. Электросвязь. 2014. № 11. С. 18-21. 0,32/ 0,11 п.л.
10. Кучерявый Е.А. Подходы к моделированию сетей связи с клиентской ретрансляцией / Пятгаев А.В., Кучерявый Е.А., Андреев С.Д. // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – Т. 52. – № 2. – С. 98-102. – 0,25 / 0,15 п.л.
11. Кучерявый, Е.А. Исследование модели управления доступом к каналам сети WIMAX / Ефимушкина Т.В., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – Т. 5. – № 7. – С. 68-71. – 0,20 / 0,10 п.л.
12. Кучерявый, Е.А. Исследование вероятностно временных характеристик функционирования соты WIMAX с несколькими режимами модуляции и эластичным трафиком данных / Ефимушкина Т.В., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2010. – Т. 4. – № 7. – С. 203-204. – 0,20 / 0,10 п.л.
13. Кучерявый, Е.А. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей / Кучерявый Е.А., Молчан С.А., Кондратьев В.В. // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 10-15. – 0,30 / 0,20 п.л.
14. Кучерявый, Е.А. Приложения беспроводных сенсорных сетей / Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 20-23. – 0,25 / 0,15 п.л.

15. Кучерявый, Е.А. Качество обслуживания в сети Интернет / Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Харью Я. // *Электросвязь*. – 2002. – № 1. – С. 9-14. – 0,25 / 0,15 п.л.

Работы в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science

16. Koucheryavy, Y. Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over narrowband IoT (NB-IoT) / V. Petrov, A. Samuylov, V. Begishev, D. Moltchanov, S. Andreev, K. Samouylov, Y. Koucheryavy // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2018. – DOI: 10.1109/IIOT.2017.2670363. – 0,80 / 0,45 п.л.
17. Koucheryavy, Y. Resource allocation and sharing for heterogeneous data collection over conventional 3GPP LTE and emerging NB-IoT technologies / V. Begishev, V. Petrov, A. Samuylov, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, K. Samouylov // *Computer Communications*. – Vol. 120. – 2018. – Pp. 93-101. – 0,60 / 0,40 п.л.
18. Koucheryavy, Y. Delivering Fairness and QoS Guarantees for LTE/Wi-Fi Coexistence Under LAA Operation / M. Maule, D. Moltchanov, P. Kustarev, M. Komarov, S. Andreev, Y. Koucheryavy // *IEEE Access* 6. – 2018. – Pp. 7359-7373. – 0,46 / 0,32 п.л.
19. Koucheryavy, Y. Adaptive Resource Management Strategy in Practical Multi-Radio Heterogeneous Networks / M. Gerasimenko, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, N. Himayat, S.-P. Yeh, S. Talwar // *IEEE Access* 5. – 2017. – Pp. 219-235. – 0,42 / 0,30 п.л.
20. Koucheryavy, Y. System-Level Analysis of IEEE 802.11ah Technology for Unsaturated MTC Traffic / A. Ometov, N. Daneshfar, A. Hazmi, S. Andreev, L.F. Del Carpio, P. Amin, J. Torsner, Y. Koucheryavy, M. Valkama // *International Journal of Sensor Networks* 10.1504/IJSNET.2017.10007402 (2017). – 0,35 / 0,10 п.л.
21. Koucheryavy, Y. Time-Dependent Energy and Resource Management in Mobility-Aware D2D-Empowered 5G Systems / A. Orsino, A. Samuylov, D. Moltchanov, S. Andreev, L. Militano, G. Araniti, Y. Koucheryavy // *IEEE Wireless Communications Magazine*. – 2017. – Vol. 24. – Issue 4. – Pp. 14-22. – 0,40 / 0,25 п.л.
22. Koucheryavy, Y. A SyMPHOnY of Integrated IoT Businesses: Closing the Gap between Availability and Adoption / J. Hosek, P. Masek, S. Andreev, O. Galinina, A. Ometov, F. Kröpfl, W. Wiedermann, Y. Koucheryavy // *IEEE Communications Magazine*. – 2017. – Vol. 55. – Issue 12. – Pp. 156-164. – 0,30 / 0,10 п.л.

23. Koucheryavy, Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems With Blocking and Directional Antennas / V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J.M. Jornet, Y. Koucheryavy // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – Vol. 16. – Issue 3. – Pp. 1791-1808. – 0,54 / 0,38 п.л.
24. Koucheryavy, Y. Cooperative Radio Resource Management in Heterogeneous Cloud Radio Access Networks / M. Gerasimenko, D. Moltchanov, R. Florea, S. Andreev, Y. Koucheryavy, N. Himayat, S.-P. Yeh, S. Talwar // IEEE Access 3. – 2015 – Pp. 397-406 – 0,44 / 0,30 п.л.
25. Koucheryavy, Y. Random Triangle: A Baseline Model for Interference Analysis in Heterogeneous Networks / A. Samuylov, Yu. Gaidamaka, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015. – Vol. 65. – Issue 8. – Pp. 6778-6782. – 0,25 / 0,15 п.л.
26. Koucheryavy, Y. 3GPP LTE-Assisted Wi-Fi Direct: Trial Implementation of Live D2D Technology / A. Pyattaev, J. Hosek, K. Johnsson, R. Krkos, M. Gerasimenko, P. Masek, A. Ometov, S. Andreev, J. Sedy, V. Novotny, Y. Koucheryavy // ETRI Journal. – 2015. – Vol. 37. – Issue 5. – Pp. 877-887. – 0,30 / 0,20 п.л.
27. Koucheryavy, Y. Optimizing Energy Efficiency of a Multi-Radio Mobile Device in Heterogeneous Beyond-4G Networks / O. Galinina, S. Andreev, A. Turlikov, Y. Koucheryavy // Performance Evaluation. – 2014. – Vol. 78. – Pp. 18-41 – 0,48 / 0,30 п.л.
28. Koucheryavy, Y. Cross-Layer Modeling of Wireless Channels: An Overview of Basic Principles / D. Moltchanov, Y. Koucheryavy // Wireless Personal Communications. – 2014. – Vol. 74. – Issue 1. – Pp. 23-44. – 0,38 / 0,30 п.л.
29. Koucheryavy, Y. Energy efficient communications for future broadband cellular networks / S. Andreev, P. Gonchukov, N. Himayat, Y. Koucheryavy, A. Turlikov // Computer Communications. – 2012. – Vol. 35. – Issue 14. – Pp. 1662-1671. – 0,28 / 0,16 п.л.
30. Koucheryavy, Y. Random-access latency optimization and stability of highly-populated LTE-based M2M deployments / O. Galinina, A. Turlikov, T. Tirronen, J. Torsner, S. Andreev, Y. Koucheryavy // Proc. 2016 IEEE International Conference on

- Communications, ICC 2016, Kuala Lumpur, Malaysia, May 22-27, 2016. – 0,24 / 0,12 п.л. – DOI: 10.1109/ICC.2016.7511236
31. Koucheryavy, Y. Assisted Handover Based on Device-to-Device Communications in 3GPP LTE Systems / A. Orsino, M. Gapeyenko, L. Militano, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, G. Araniti // Proc. 2015 IEEE Globecom Workshops, San Diego, CA, USA, December 6-10, 2015. – 0,24 / 0,12 п.л. – DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414095
 32. Koucheryavy, Y. Modeling contention-based M2M transmissions over 3GPP LTE cellular networks / A. Ahmadian, O. Galinina, S. Andreev, Y. Koucheryavy // Proc. 2014 IEEE International Conference on Communications, ICC 2014, Sydney, Australia, June 10-14, 2014, Workshops Proceedings. – 0,24 / 0,14 п.л. – DOI: 10.1109/ICCW.2014.6881238
 33. Koucheryavy, Y. Network-assisted D2D communications: Implementing a technology prototype for cellular traffic offloading / A. Pyattaev, K. Johnsson, A. Surak, R. Florea, S. Andreev, Y. Koucheryavy // Proc. 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2014, Istanbul, Turkey, April 6-9, 2014. – 0,26 / 0,15 п.л. – DOI: 10.1109/WCNC.2014.6953070
 34. Koucheryavy, Y. Characterizing performance of load-aware network selection in multi-radio (WiFi/LTE) heterogeneous networks / M. Gerasimenko, N. Himayat, S.-P. Yeh, S. Talwar, S. Andreev, Y. Koucheryavy // Proc. 2013 Workshops Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM 2013, Atlanta, GA, USA, December 9-13, 2013. – 0,25 / 0,10 п.л. – DOI: 10.1109/GLOCOMW.2013.6825020
 35. Koucheryavy, Y. Efficient Small Data Access for Machine-Type Communications in LTE / S. Andreev, A. Larmo, M. Gerasimenko, V. Petrov, O. Galinina, T. Tirronen, J. Torsner, Y. Koucheryavy // Proc. 2013 IEEE International Conference on Communications, ICC 2013, Budapest, Hungary, June 9-13, 2013. – 0,24 / 0,12 п.л. – DOI: 10.1109/ICC.2013.6655105
 36. Koucheryavy, Y. Performance Analysis of Client Relay Cloud in Wireless Cellular Networks / O. Galinina, S. Andreev, Y. Koucheryavy // Proc. Wired/Wireless Internet Communication - 10th International Conference, WWIC 2012, Santorini, Greece, June 6-8, 2012. Proceedings. Lecture Notes in Computer Science 7277, Springer 2012, ISBN 978-3-642-30629-7. Pp. 40-51. – 0,28 / 0,16 п.л.

37. Koucheryavy, Y. Three node client relay system with packet retry limit / S. Andreev, O. Galinina, Y. Koucheryavy, A. Lokhanova // Proc. 16th IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, CAMAD 2011, Kyoto, Japan, June 10-11, 2011. – 0,22 / 0,12 п.л. – DOI: 10.1109/CAMAD.2011.5941110
38. Koucheryavy, Y. Energy-Efficient Client Relay Scheme for Machine-to-Machine Communication / S. Andreev, O. Galinina, Y. Koucheryavy // Proc. 2011 IEEE Global Communications Conference, IEEE GLOBECOM 2011, 5-9 December 2011, Houston, Texas, USA. – 0,26 / 0,19 п.л. – DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133603