

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

**Кучерявого Андрея Евгеньевича**

на диссертацию Аммара Салеха Али Мутханны «Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и последующих поколений», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время развитие сетей и систем связи базируется на концепциях Интернета Вещей и Тактильного Интернета. Эти концепции приводят к принципиальным количественным, а значит и качественным, изменениям в построении и планировании сетей связи пятого и последующих поколений. Действительно, реализация концепции Интернета Вещей приводит к появлению высокоплотных и сверх плотных сетей с числом узлов в 1 млн и более на кв.км, а реализация концепции Тактильного Интернета уменьшает задержку на сетях связи до 1мс.

Кроме того, в начале третьего десятилетия 21 века стало ясно, что нескоординированное развитие мобильных и фиксированных сетей связи не способствует решению проблемы интегрирования всех ресурсов всех сетей для предоставления современных услуг всем пользователям сетей связи общего пользования и на этапе формирования подходов к реализации сетей связи шестого поколения 6G появилась новая концепция развития сетей связи, в основе которой лежит понимание необходимости интеграции не только разнообразных технологий в рамках тех или иных сетей, но и интеграции сетей связи в единую сеть. Эта концепция называется интегрированные сети Космос-Воздух-Земля-Море SAGSIN (Space-Air-Ground-Sea). Представляется, что эта концепция определяет множество научных проблем и задач, по крайней мере, на ближайшее

десятилетие. В связи с изложенным диссертационная работа, в которой решается научная проблема разработки и исследования комплекса моделей и методов интеграции граничных и туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений для глобального фрагмента Воздух-Земля концепции SAGSIN является актуальной.

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Метод построения мульти контроллерной сети, основанный на интегральном решении задач по размещению контроллеров в мульти контроллерных сетях, базирующийся на мета эвристическом алгоритме вследствие сложности решаемых задач, и алгоритме балансировки нагрузки, позволяет обеспечить наилучшее использование ресурсов контроллеров в таких сетях.

2. Модифицированный алгоритм хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA позволяет уменьшить долю отказов в обслуживании со стороны контроллера и увеличить общее использование системы во всем диапазоне изменения задержки от 1мс до 10мс по сравнению как с широко известными мета эвристическими алгоритмами роя частиц PSO (Particle Swarm Optimization) и серого волка GWO (Grey Wolf Optimization), так и с предыдущей версией хаотического алгоритма роя сальп CSSA (Chaotic Salp Swarm Algorithm). При этом для наиболее сложного случая задержки величиной в 1мс выигрыш по доле отказов и по общему использованию системы достигает значения более, чем в 2 раза.

3. Модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности, в котором процедура выгрузки трафика является трехуровневой, причем на конечных устройствах используется программный профилировщик, определяющий сложность вычисляемой задачи, а по результатам его работы механизм принятия решения определяет необходимость выгрузки трафика. Кроме того, на втором уровне процедуры выгрузки трафика сервер БПЛА, на который

выгружается трафик, может принять решение в условиях недостаточного объема ресурсов выгрузить трафик на сервер другого БПЛА. При этом результаты моделирования доказали, что обеспечиваются уменьшение задержки до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений и на 30-40% по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе мета эвристического хаотического роя салп дает дополнительный выигрыш около 10% по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

4. Модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение энергопотребления до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе мета эвристического хаотического роя салп дает дополнительный выигрыш в 5-10% по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

5. Модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение доли заблокированных задач по выгрузке трафика в десятки раз по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений, в разы по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Использование оптимизации на основе мета эвристического хаотического роя салп не дает практически значимого эффекта по сравнению с неоптимизированным алгоритмом. Кроме того, определены зависимости значений задержки, энергопотребления и доли заблокированных задач по выгрузке трафика от плотности сети.

6. Метод построения сети с интеграцией технологий MEC, SDN и D2D для поддержки приложений беспилотных автомобилей и алгоритм кластеризации на основе взаимодействий D2D для транспортных средств в непокрытых зонах и для

выгрузки трафика сети в регионах с интенсивным движением дает 74% прироста производительности системы в терминах вероятности блокировки задач.

7. Метод прогнозирования на основе CNN - LTP-CNN, который предсказывает трафик сети IoT по информации о состоянии сети за предыдущий интервал времени, реализующийся на туманных узлах, которые представляют собой основную часть сетей IoT/5G позволяет предсказывать трафик сети IoT с точностью около 90%.

8. Метод размещения SDN-контроллеров в мульти контроллерных сетях, который предусматривает размещение контроллеров на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети, позволяет уменьшить задержку на 60% по сравнению с традиционными моделями граничных вычислений, а также снизить потребляемую энергию на 72% по сравнению с методом Fog-MEC.

Практическая ценность работы состоит в создании научно-обоснованных рекомендаций по интеграции граничных и/или туманных вычислений в современных сетях связи с учетом массового внедрения новых услуг связи, включая услуги телеприсутствия, что реализуется как в методиках планирования сетей связи ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ», так и в международных стандартах (рекомендациях) Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке методик планировании сетей связи пятого поколения, в ФГУП НИИР при выполнении государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций Администрации связи Российской Федерации в Секторе стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи в работах по разработке стандартов (вкладов), в РУДН при создании научного центра моделирования беспроводных сетей 5G, в Уфимском университете науки и технологий при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ, в Санкт-Петербургском

государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при проведении работ по Мегагранту «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» по соглашению № 075-15-2022-1137 с Министерством науки и высшего образования РФ, чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурального и имитационного моделирования, а также широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на международных научных конференциях.

Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены на следующих конгрессах, конференциях и семинарах: Международной конференции по проводным и беспроводным сетям и системам следующего поколения NEW2AN (Санкт-Петербург, 2015 - 2020); Международной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN (Москва, 2017- 2021); Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО (Санкт-Петербург, 2019–2022); Региональной научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» ПКМ (Санкт-Петербург, 2022); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 2017, 2021); 4-й Международной конференции по сетям будущего и распределенным системам ICFNDS (Санкт-Петербург, 2017-2020); Международном конгрессе ультрасовременных телекоммуникаций и систем управления (ICUMT), IEEE Конференции молодых ученых России в области электротехники и электронной техники (ElConRus 2017), IEEE Международной конференции по электротехнике и фотонике (EexPolytech 2019), 4-я Международной конференции МЕС по большим данным и умному городу (ICBDSC 2019), XXII Международной конференции по программным

вычислениям и измерениям (SCM 2019)), Международном симпозиуме по потребительским технологиям (ISCT 2018), 20-ой международной конференции по передовым коммуникационным технологиям (ICACT, 2018). IEEE конференции Системы синхронизации, генерации и обработки сигналов в телекоммуникациях (SINKHROINFO 2017), 18-ой конференции Ассоциации «Открытые инновации» и семинару по информационной безопасности и защите информационных технологий (FRUCT-ISPIT 2016), 38-ой Международной конференции по телекоммуникациям и обработке сигналов (TSP 2015), 15-ой Международной конференции “Проводные/беспроводные интернет-коммуникации” IFIP WG (WWIC 2017). 14-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» ПТСПИ (Владимир, 2021), Молодежной научной школе по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ-2017). Были сделаны доклады на пленарных заседаниях следующих конференций: Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО (Санкт-Петербург 2022), Международной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN (Москва 2022) и 5-ой Международной школе прикладной теории вероятностей, Коммуникационные технологии и наука о данных (АРТСТ-2020).

Результаты диссертационного исследования сформулированы технически грамотным языком, стиль изложения четок и ясен.

Основные результаты диссертации изложены в 137 опубликованных работах, в том числе в 24 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 87 работах в изданиях, включенных в международные базы цитирования; 2 результатах интеллектуальной деятельности; 6 отчетах о НИР; 18 работах в других научных изданиях и материалах конференций.

Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 18.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа “Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и последующих поколений” соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям, а ее автор Аммар Салех Али Мутханна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Научный консультант,

заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ,

доктор технических наук, профессор



Андрей Евгеньевич Кучерявый

01 сентября 2023 года

Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Юридический адрес: наб. р. Мойки, д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, Санкт-Петербург, 193232

Тел.: (812) 3263156, факс (812) 3263159, e-mail: rector@sut.ru, web-сайт: www.sut.ru

Подпись (-и) А.Е. Кучерявого  
заверяю

Административно-кадрового управления  
/В.В. Новикова/ 01.09.2023

