

ОТЗЫВ

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

Новая концепция интегрированных сетей Космос-Воздух-Земля-Море SAGSIN (Space-Air-Ground-Sea) в начале третьего десятилетия XXI века знаменует собой очередной этап развития цифровой экосистемы пятого и шестого поколений, в основе которой лежит интеграция разнообразных технологий и услуг в единую сеть. Составными сегментами перспективных сетей являются принципиально разные по своим принципам построения и особенностям функционирования сети беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), взаимодействия устройство-устройство D2D (Device-to-Device), автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), беспилотных автомобилей, Интернета Вещей. Известными на сегодняшний день методами и средствами интеграции развернутых и проектируемых сетевых сегментов являются подходы, основанные на граничных вычислениях, искусственном интеллекте (ИИ) и программно-конфигурируемых сетях (SDN). Научно-обоснованная постановка комплексной задачи сетевой интеграции является первым и основополагающим шагом для поиска технических решений по организации эффективного сквозного взаимодействия разнородных сетевых технологий и конкурентоспособной реализации принципиально новых услуг на их основе. Обоснованная автором цель разработки комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений дает все основания говорить о возникновении новой научной проблемы создания методологии интеграции граничных вычислений в сетях SAGSIN, что определяют *актуальность* темы и результатов представленного диссертационного исследования.

Анализ автореферата позволяет сделать вывод о том, что диссертационное исследование Мутханна Аммара Салеха Али является самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, к наиболее значимым *новым научным результатам* которой можно отнести следующие:

1. Решена научная задача, отличающаяся от известных тем, что предложен метод построения мультиконтроллерной сети, основанный на интегральном решении задач по размещению контроллеров в мультиконтроллерных сетях, базирующийся на метаэвристическом алгоритме вследствие сложности решаемых задач, и алгоритме балансировки нагрузки, позволяющем обеспечить наилучшее использование ресурсов контроллеров в таких сетях.

2. Для решения научной задачи интеграции размещения контроллеров в мультиконтроллерных сетях и балансировки нагрузки предложено использовать в отличие от известных решений иерархическую кластеризацию мультиконтроллерной сети, включающую в себя кластеры с головными узлами и централизованный контроллер, что обеспечивает балансировку нагрузки в разработанном методе построения сети.

3. Для решения научной задачи интеграции контроллеров в мультиконтроллерных сетях и балансировки нагрузки в отличие от известных решений разработан модифицированный алгоритм хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA, что 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 метаэвристическими 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.

4. Для решения научной задачи интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности разработаны модель сети, отличающаяся от известных тем, что предложено для уменьшения задержки и энергопотребления в такой сети использовать мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА и метод выгрузки трафика с наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА, отличающийся от известных тем, что процедура выгрузки трафика является трехуровневой, причем на конечных устройствах используется программный профилировщик, который определяет сложность вычисляемой задач и 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. Результаты моделирования доказали, что разработанные модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают 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 метаэвристического хаотического роя салпы дает дополнительный выигрыш около 10% по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

5. Результаты моделирования доказали, что разработанные 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 метаэвристического хаотического роя салпы дает дополнительный выигрыш в 5-10 % по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

6. Результаты моделирования доказали, что разработанные 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 метаэвристического хаотического роя салпы 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.

7. В отличие от известных решений предложен новый метод построения сети с использованием технологий MEC, SDN и D2D для поддержки приложений беспилотных автомобилей. Предлагаемая архитектура направлена на преодоление двух основных проблем автомобильных сетей – высокой плотности трафика и наличия непокрытых зон в автомобильной сети связи. При этом, разработан также алгоритм кластеризации на основе взаимодействий D2D для транспортных средств в непокрытых зонах и для выгрузки трафика сети в регионах с интенсивным движением. Результаты моделирования показывают, что предложенная архитектура дает 74 % прироста производительности системы в терминах вероятности блокировки задач.

8. Разработан метод прогнозирования трафика на основе CNN – LTP-CNN, который предсказывает трафик сети IoT на базе состояния сети за предыдущий интервал времени, отличающийся от известных тем, что алгоритм прогнозирования реализован на туманных узлах, которые представляют собой основную часть сетей IoT/5G. Результаты показывают, что разработанный LTP-CNN может предсказывать трафик сети IoT с точностью около 90 %.

9. Разработан метод размещения SDN-контроллеров в мультиконтроллерных сетях, отличающийся тем, что контроллеры могут располагаться на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети, что позволяет уменьшить задержку на 60 % по сравнению с традиционными моделями граничных вычислений на базе SDN, а также снизить потребляемую энергию на 72 % по сравнению с методом Fog-MEC на базе SDN.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается прежде всего, в разработке и исследовании комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений для глобального фрагмента Воздух-Земля концепции SAGSIN, что закладывает основы для перехода сетей связи общего пользования в среднесрочной перспективе к интегрированным сетям.

К практическим научным результатам следует отнести, в первую очередь, создание 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.

Материалы диссертационного исследования в полном объеме отражены в публикациях автора и прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

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.

По автореферату имеются *следующие замечания:*

1. В формуле 1 на стр. 15 автореферата в выражении $C_3 \geq 0F_i - C$ возможно пропущена запятая после $C_3 \geq 0$.
2. В формуле у на стр. 16 автореферата перед выражением $2 \leq k < n$ возможно пропущена запятая.
3. Из рис. 2 и 3 на стр. 17 не до конца остался ясным физический смысл 16 топологий, показанных на оси x представленных графиков.
4. Из рис. 4 на стр. 18 не до конца остался ясным физический смысл верхней границы индекса использования SDN-контроллера и кластера.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают ценности полученных автором результатов. Судя по автореферату, диссертация «Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений» соответствует пунктам 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 18 паспорта специальности 2.2.15, выполнена на высоком уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в которой присутствуют теоретическая значимость, научная новизна и практическая ценность. Считаю, что работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Мутханна Аммар Салех Али, заслуживает присвоения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

8 ноября 2023 г.

Доцент кафедры «Сети связи
и системы коммутации»,
кандидат технических наук, доцент

Степанов
Михаил Сергеевич

Подпись Степа́нова М.С. удостоверяю

М.С. Степа́нов

К.С. Степанов

Организация: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». Почтовый адрес: 111024, г. Москва, Авиамоторная ул., 8а
Тел.: (495) 957-77-31
E-mail: mtuci@mtuci.ru