

На правах рукописи

Мутханна Аммар Салех Али

**Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции
граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Официальные
оппоненты: **Колбанев Михаил Олегович**,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный экономический
университет, кафедра информационных систем и
технологий, профессор кафедры.

Никульский Игорь Евгеньевич,
доктор технических наук, с.н.с.,
ПАО «Центральное научно-производственное
объединение «Ленинец»», главный специалист,
заместитель Главного конструктора

Татарникова Татьяна Михайловна,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Институт
информационных технологий и программирования,
директор института

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки институт проблем управления
им В. А. Трапезникова Российской академии наук,
г. Москва

Защита состоится 15 декабря 2023 года в 14.00 на заседании
диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-
Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 15 сентября 2023 года.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

А.И. Парамонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие сетей связи за последние 20 лет можно охарактеризовать появлением целого ряда новых технологий, которые вначале обеспечили возможности предоставления достаточно широкого спектра услуг пользователям сети, включая масштабное развитие мобильной телефонии, а впоследствии и мобильной передачи данных и видео, а затем к настоящему времени привели к принципиальному изменению как в принципах построения сети, так и в предоставляемых пользователям услугах. При этом ключевую роль в формировании нового облика сетей связи и предоставляемых сетью услугах сыграли концепции Интернета Вещей и Тактильного Интернета. Первая способствовала появлению сетей высокой и сверхвысокой плотности, а вторая – сетей связи с ультра малыми задержками. Все это вместе взятое потребовало комплексного использования ресурсов всевозможных сетей и преобразовало сети связи из гомогенных в гетерогенные.

В начале третьего десятилетия XXI 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.

Разработанность темы исследования. Существует множество работ в области сетей 5G и последующих поколений, высокоплотных и сверхплотных сетей, сетей связи с ультра малыми задержками как теоретического, так и экспериментального плана.

Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования этих научных проблем внесли российские и зарубежные ученые В. М. Вишневецкий, К.Е.Самуйлов, Ю. В. Гайдамака, Б. С. Гольдштейн, В. Г. Карташевский, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый, Е.А.Кучерявый, М. С. Маколкина, Д.А.Молчанов, Р. В. Киричек, А. П. Пшеничников, В. К. Сарьян, С. Н. Степанов, М. А. Сиверс, Н. А. Соколов, В. О. Тихвинский, М. А. Шнепс-Шнеппе, M. Dohler, G. Fettweis, J. Nosek, A. A. Ateya, M. Maier, M. Z. Shafiq и другие.

Настоящая диссертация в отличие от известных подходов к построению и исследованию сетей связи направлена на решение научной проблемы разработки и исследования комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений для глобального фрагмента Воздух-Земля концепции SAGSIN.

Обеспечение эффективности интеграции глобального фрагмента сети SAGSIN может быть достигнуто только при интеграции различных технологий телекоммуникаций, обеспечивающих собственно построение как наземных и воздушных сетей. Поэтому в диссертационной работе при разработке комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений исследуются проблемы их интеграции для сетей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), программно-конфигурируемых сетей SDN (Software Defined Networks), сетей взаимодействия устройство-устройство D2D (Device-to-Device), сетей автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), беспилотных автомобилей, Интернета Вещей,

По каждой из этих технологий также существует достаточно большое число работ отечественных и зарубежных ученых В. М. Вишневого, К. Е. Самуйлова, Ю. В. Гайдамаки, В. Г. Карташевского, А. И. Парамонова, А. Е. Кучерявого, Е. А. Кучерявого, Д. А. Молчанова, С. Д. Андреева, Р. В. Киричка, В. К. Сарьяна, Р. Л. Смелянского, Е. М. Хорова, Ian F. Akyildiz, M. Dohler, G. Fettweis, J. Hoesk, A. A. Ateya, M. Maier, Halim Yanikomeroglu, M. Z. Shafiq, Tarik Taleb и других.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются сети связи пятого и последующих поколений. Предметом исследования является комплекс моделей и методов интеграции граничных и туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений.

Цель работы достигается путем последовательного решения следующих задач:

– анализ существующего положения в области исследования сетей связи пятого и последующих поколений, роли и места граничных и/или туманных вычислений, а также сетей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), программно-конфигурируемых сетей SDN (Software Defined Networks), сетей взаимодействия устройство-устройство D2D (Device-to-Device), сетей автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), беспилотных автомобилей, Интернета Вещей в развитии сетей и систем связи;

– разработка метода иерархической кластеризации мультиконтроллерной сети, включающую в себя кластеры с головными узлами и централизованный контроллер,

- разработка метода построения мультиконтроллерной сети, основанного на интегральном решении задач по размещению контроллеров в мультиконтроллерных сетях, использующего как метаэвристический алгоритм, так и алгоритм балансировки нагрузки,

- разработка модифицированного алгоритма хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA,

- разработка модели сети с мобильными серверами граничных вычислений на БПЛА и метода выгрузки трафика с наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА с трехуровневой процедурой выгрузки,

- анализ эффективности предложенных методов построения сетей Воздух-Земля по сравнению с существующими по параметрам задержки, энергетической эффективности и доли заблокированных задач по выгрузке трафика,

- разработка метода построения сети с использованием технологий MEC, SDN и D2D для поддержки приложений беспилотных автомобилей,

- разработка метода прогнозирования трафика на основе CNN - LTP-CNN с реализацией алгоритма прогнозирования на туманных узлах,

- разработка метода размещения SDN-контроллеров в мультиконтроллерных сетях на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в высокоплотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Решена научная задачи, 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 отличии 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 сальп 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 сальп 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 сальп 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 работы. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, 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. Это закладывает основы для перехода сетей связи общего пользования в среднесрочной перспективе к интегрированным сетям.

Важными результатами, имеющими существенную теоретическую ценность, представляются 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, решения по иерархической кластеризации мультиконтроллерной сети, модифицированный алгоритм хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA, трехуровневая процедура выгрузки трафика, модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Самостоятельную научную ценность имеет метод размещения SDN-контроллеров в мультиконтроллерных сетях на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети.

Практическая ценность работы. 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.

Реализация результатов работы. 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. Акты реализации диссертационных исследований представлены в Приложении Б.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории оптимизации, теории вероятностей, а также метаэвристические алгоритмы и методы имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. 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, 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 1 мс до 10 мс 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.

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 метаэвристического хаотического роя сальп 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 метаэвристического хаотического роя сальп 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 метаэвристического хаотического роя салеп 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 мультиконтроллерных 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.

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

Апробация работы. 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, 2018–2021), 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 MEC 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-й 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).

Публикации. 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. 7 работ опубликовано без соавторов.

Соответствие паспорту специальности. 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 393 страниц машинописного текста, 75 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 366 наименований.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены ее основные результаты и область их применения, отмечена практическая ценность и научная новизна, а также приведены сведения об апробации работы и представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу развития современных сетей связи, анализу существующего положения в области исследования сетей связи пятого и последующих поколений, роли и места граничных и/или туманных вычислений, а также сетей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), программно-конфигурируемых сетей SDN (Software Defined Networks), сетей взаимодействия устройство-устройство D2D (Device-to-Device), сетей автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), беспилотных автомобилей, Интернета Вещей в развитии сетей и систем связи.

Анализ показал, что в начале третьего десятилетия XXI века дальнейшее 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), рисунок 1.

Целями данной диссертации являются изучение вопроса интеграции уровней сетей (наземной и летающей), разработка подходящего метода интеграции с использованием таких технологий, как граничные вычисления, искусственный интеллект (ИИ) и программно-конфигурируемые сети (SDN). Интегрированная архитектура выбрана на основе рекомендаций и обзора литературы по сетям 6G и

ключевым технологиям, спецификациям, технологиям связи внутри и между уровнями, сценариям использования и важнейшим показателям производительности.

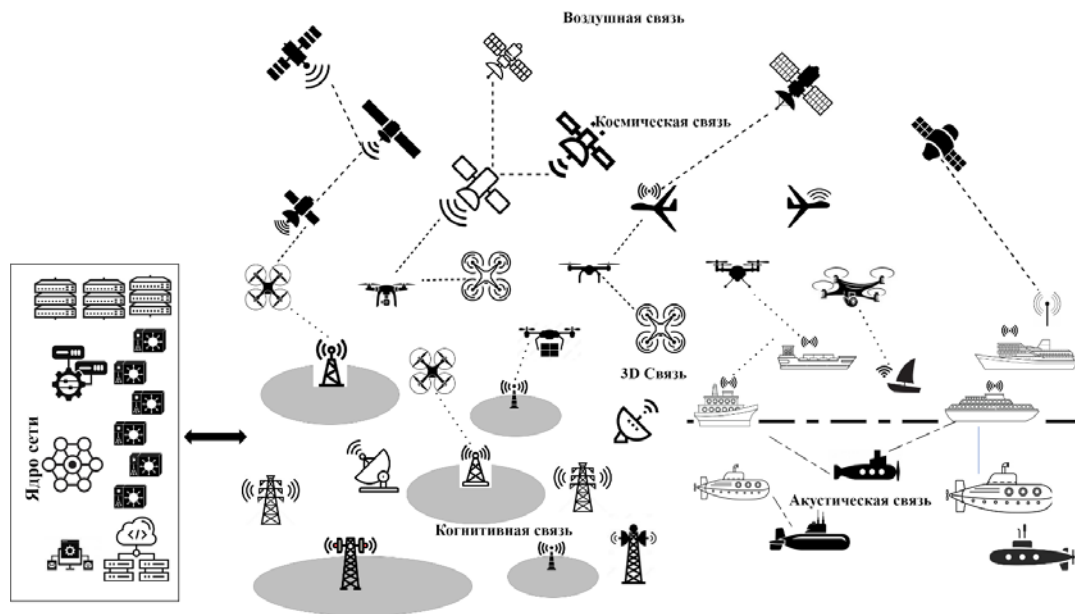


Рисунок 1 – Интегрированные сети Космос-Воздух-Земля-Море SAGSIN (Space-Air-Ground-Sea)

В данной главе рассматривается архитектура наземной сети, способной обрабатывать трафик со всех уровней. Численное моделирование и симуляция работы позволят предсказать производительность сети. Кроме того, для всех ключевых элементов, включая высокопроизводительные граничные вычислительные узлы, контроллеры SDN, коммутаторы OpenFlow и интерфейсы, будут определены характеристики и установлены технические требования. Наземная сеть, которая выступает ядром системы, будет спроектирована с учетом требований приложений 6G. Ключевые особенности проектирования сетей радиодоступа (RAN) 6G заключаются в создании сверхплотных сетей, гетерогенных сетей, интеллектуальных и адаптивных сетей, а также в повышении энергоэффективности. Интеграция наземного и летающего уровней сетей является главной задачей, при этом используются искусственный интеллект и распределенные вычисления на границе для достижения бесшовного соединения, непрерывного покрытия и эффективного распределения ресурсов.

Ядро сети рассматривается с использованием парадигмы программно-конфигурируемых сетей (SDN), а для обеспечения гибкости, доступности, надежности и масштабируемости применяются методы оптимизации роевого интеллекта. В ядре сети используются мультиконтроллерные структуры SDN, коммутаторы OpenFlow, подход программируемости сети, виртуализация и оркестрация, сервис-ориентированная архитектура, нарезка сетевых ресурсов, интеллектуальное управление ресурсами, функциональная совместимость и открытые интерфейсы. Также целью

данной работы является интеграция всех рассматриваемых компонентов и общая оценка системы.

Система предусматривает взаимодействие наземной и летающей сети, отвечающей требованиям 6G.

Интегрированные летающие сети являются ключевыми компонентами сетей 6G. Ожидается, что эти сети будут играть важную роль в реализации требований 6G к беспроводной связи. Более того, интеграция таких сетей с наземными сетями является очень востребованной. Однако такая инфраструктура сталкивается со многими проблемами, включая взаимодействие гетерогенных каналов, обработку огромного объема трафика и требования безопасности. Кроме того, еще одной проблемой проектирования являются требования сетей 6G. Достижение сверхвысокой доступности и надежности с субмиллисекундной задержкой для комплексных сетей является большой проблемой.

Интеграцию уровней можно увидеть в структуре сети, представлены также методы интеграции для этих уровней. Интеграция осуществляется с использованием новых технологий, включая граничные вычисления, искусственный интеллект и программно-конфигурируемые сети (SDN). Методология этой архитектуры может быть представлена следующим образом.

В главе были рассмотрены также общие положения и характеристика устройств 6G и основные ключевые технологии.

Для рассматриваемых уровней сетей сосредоточимся на выделении основных требуемых спецификаций, поддерживаемых внутри межуровневых технологий связи, основных сценариев использования и ключевых показателей эффективности (KPIs).

Архитектура наземной сети обрабатывает все типы трафика. Также численное моделирование и симуляция работы с использованием высокоуровневого программного обеспечения будет постоянно поддерживать прототипирование аппаратного обеспечения и поможет прогнозировать производительность и интерпретировать результаты. Кроме того, разработка модели включает в себя определение точных технических характеристик, например, мощности, пропускной способности и интерфейсов, необходимых устройств и оборудования.

Сюда входят модули радиодоступа, высокопроизводительные граничные вычислительные узлы, контроллеры SDN, коммутаторы OpenFlow и сетевые интерфейсы. Также определены характеристики всех ключевых устройств сети и ее элементов.

Во второй главе предложено совместно использовать кластеризацию сети и метаэвристический хаотический алгоритм «роя сальп», хорошо зарекомендовавший себя в предыдущих исследованиях по проблемам построения мультиконтроллерных сетей. С учетом интегрального решения проблемы размещения контроллеров на базе

кластеризации мультиконтроллерной сети и балансировки нагрузки алгоритм «роя сальп» в главе модифицирован. Анализ эффективности предложенного решения проведен путем сравнения результатов моделирования как с широко известными метаэвристическими алгоритмами «роя частиц» (PSO) и «серого волка» (GWO), так и с предыдущей версией хаотического алгоритма «роя сальп» (CSSA).

Наиболее эффективным методом построения ядра сетей связи пятого и последующих поколений в настоящее время представляется использование мультиконтроллерных программно-конфигурируемых сетей SDN. Поскольку создание ядра сети влечет за собой достаточно большие затраты при планировании сетей связи пятого и последующих поколений, одно из приоритетных мест в исследованиях такой проблемы занимают вопросы оптимизации построения ядра сети. К настоящему времени существует целый ряд алгоритмов для размещения контроллеров в мультиконтроллерных сетях, основанных на метаэвристических методах вследствие сложности решаемых задач, и алгоритмов балансировки нагрузки, позволяющих обеспечить наилучшее использование их ресурсов. Однако интегрального решения проблемы размещения контроллеров и балансировки нагрузки пока найдено не было.

В этой главе представляется процедура оптимизации на основе CSSA для решения задачи размещения контроллеров в кластерной сети SDN в постановке, сформулированной в данной главе диссертации. Разработанный алгоритм является модифицированной версией CSSA.

Алгоритм CSSA – это метаэвристический популяционный алгоритм, имитирующий поведение сальпы в океанах. Это недавний тип оптимизаторов PSO, который моделирует поведение живых роев в реальной жизни. Рой сальп состоит из сальпы-лидера и сальп-последователей, которые движутся по цепочке вслед за лидером к позиции пищи, которая является наилучшей для них. Позиция сальпы моделируется как d -мерное пространство поиска, где d представляет собой количество переменных в определенной задаче, точно так же, как и другие алгоритмы на основе роя.

Вектор позиции n сальп в пространстве поиска имеет вид $X^j = [x_1^j, x_2^j, x_3^j, \dots, x_d^j]$, $j = 1, 2, \dots, n$, и лидер обновляет свою позицию, используя следующее уравнение:

$$\begin{aligned} X_i^1 &= \{F_i + C_1((ub_i - ul_i)C_2 + lb_i), \\ C_3 \geq 0 & F_i - C_1((ub_i - ul_i)C_2 + lb_i), C_3 \\ &< 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_i^1 обозначает положение сальпы-лидера в измерении i^{th} ; F_i – положение пищи в измерении i^{th} ; ub_i и lb_i – верхняя и нижняя границы в измерении i^{th} ; C_1 , C_2 , и C_3 – коэффициенты модели (представляют собой случайные числа, которые используются для решения определенных задач).

Первый коэффициент C_1 вводится для обеспечения баланса между разведкой и эксплуатацией, представляет собой наиболее важный параметр в алгоритме и определяется следующим образом:

$$C_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{T_{max}}\right)^2}, \quad (2)$$

где t – текущая итерация; T_{max} – максимальное число итераций.

C_2 и C_3 – случайные числа, которые равномерно генерируются со значениями от 0 до 1. Сальпы-последователи обновляют свои позиции на основе закона движения Ньютона, используя следующее уравнение:

$$X_i^k = \frac{1}{2}(X_i^k + X_i^{k-1}) \quad 2 \leq k < n, \quad (3)$$

где X_i^k – положение k^{th} последователей сальпа в i^{th} измерении; n – общее число частиц сальп.

Чтобы избежать спада в локальных оптимумах и низкой скорости сходимости, введем хаотические карты в рассматриваемый оптимизатор «роя сальп». Хаотические карты вводятся для обновления оптимизатора вместо случайных чисел.

Используем хаотическую карту для настройки значения второго коэффициента C_2 следующим образом:

$$C_2^t = \omega(t), \quad (4)$$

$$\omega(t + 1) = a\omega(t)[1 - \omega(t)], \quad a = 4, \quad (5)$$

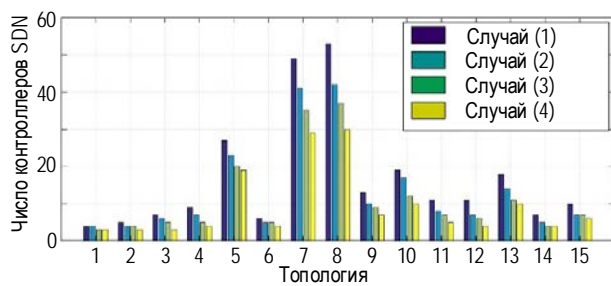
где $\omega(t)$ – значение логистической карты на итерации t^{th} , с начальным условием 0,7, т. е. $\omega(0) = 0,7$.

Далее определим оптимальное количество SDN-контроллеров и кластеров, а также оптимальное соединение для каждого коммутатора в наборе коммутаторов S . Путем итераций несколько роев сальп параллельно ищут оптимальные решения, которые представляют собой оптимальное количество контроллеров, и кластеров, а также оптимальное распределение контроллеров между коммутаторами. При этом для получения оптимальных решений вводятся три вложенных алгоритма, основанных на ранее представленном хаотическом рое сальп.

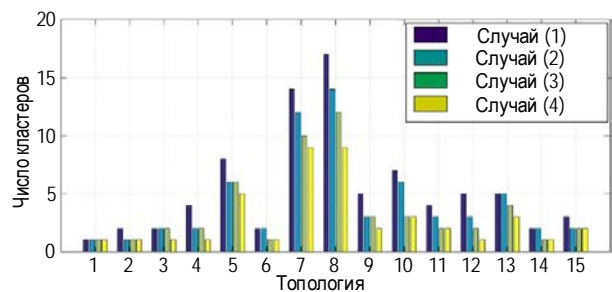
Результаты показывают, что оптимальное количество активных SDN-контроллеров уменьшается по мере увеличения порогового времени отклика и индекса максимального использования каждого SDN-контроллера, а значит, уменьшается и оптимальное количество кластеров. С увеличением порогового времени отклика и индекса максимальной загрузки SDN-контроллер обрабатывает большее количество коммутаторов. Это происходит за счет задержки, которая должна поддерживать требуемое QoS системы и нагрузки на контроллер, которая увеличивает вероятность сбоя и, кроме того, потребляет больше энергетических ресурсов.

Разработанный оптимизированный метод кластеризации реализован для случайной сети с плоскостью данных из 100 коммутаторов, чтобы оценить производительность CSSA для сетей большого масштаба. Основной целью данного сценария моделирования является оценка влияния вариации параметров сети на производительность оптимизированного метода кластеризации. Производительность системы измеряется в широком диапазоне порогового времени обработки SDN-контроллера T_{thr} верхнего индекса использования SDN-контроллера U_{ub} и верхней границы индекса использования кластера U_{c-ub} .

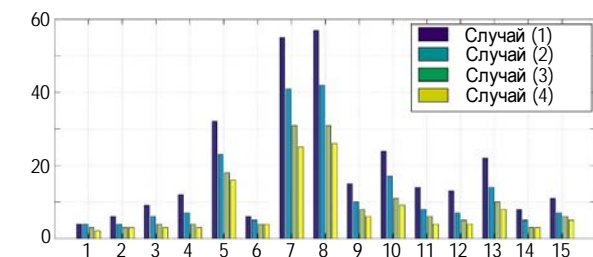
Изменение этих параметров является критическим и оказывает значительное влияние на оптимальные топологические решения; особенно для крупномасштабных сетей с высокоплотным развертыванием; более того – большое влияние на QoS сети.



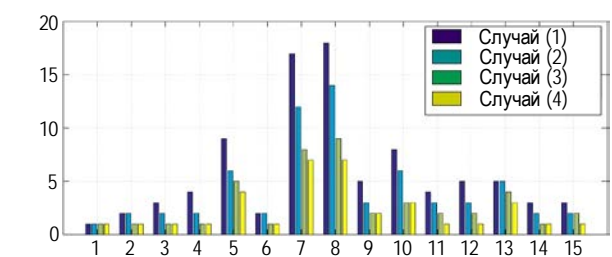
a)



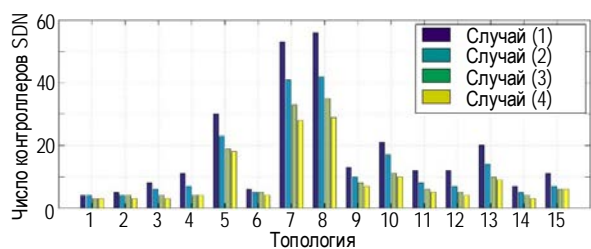
a)



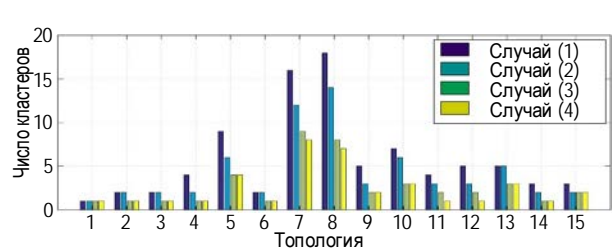
b)



b)



c)



c)

Рисунок 2 – Оптимальное число SDN-контроллеров для каждой топологии
Сценария I (a), Сценария II (b),
Сценария III (c)

Рисунок 3 – Оптимальное число кластеров для каждой топологии
Сценария I (a), Сценария II (b),
Сценария III (c)

Далее для моделирования рассматриваются три сценария с десятью случаями (рисунки 2–3). В первом сценарии оценивается влияние изменения порогового времени

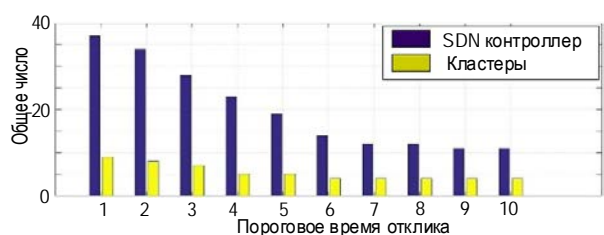
обработки SDN-контроллера T_{thr} , во втором сценарии – верхнего индекса использования SDN-контроллера U_{ub} , а в третьем сценарии – верхней границы индекса использования кластера U_{C-ub} .

Для каждого сценария рассматривается десять значений каждого параметра, а каждое значение представляет собой вариант моделирования. В таблице 1 приведены значения рассматриваемых параметров для каждого варианта по каждому сценарию.

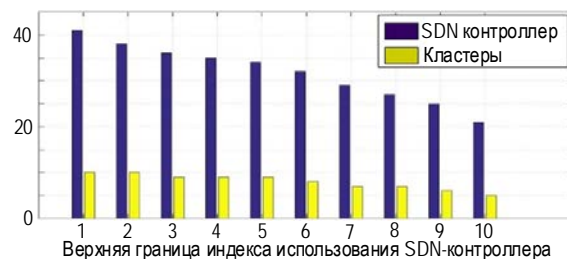
На рисунке 4 представлены результаты для трех упомянутых в таблице 1 сценариев моделирования.

Таблица 1 – Десять наборов параметров для трех сценариев моделирования

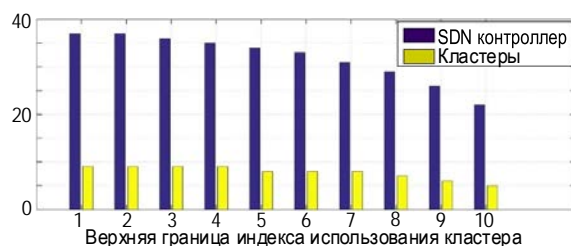
Ссылка. Номер	Сценарий I	Сценарий II	Сценарий III
Вариант (1)	$T_{thr-1} = 1$ мс	$U_{ub1} = 0,86$	$U_{C-ub1} = 0,86$
Вариант (2)	$T_{thr-2} = 2$ мс	$U_{ub2} = 0,87$	$U_{C-ub2} = 0,87$
Вариант (3)	$T_{thr-3} = 3$ мс	$U_{ub3} = 0,88$	$U_{C-ub3} = 0,88$
Вариант (4)	$T_{thr-4} = 4$ мс	$U_{ub4} = 0,89$	$U_{C-ub4} = 0,89$
Вариант (5)	$T_{thr-5} = 5$ мс	$U_{ub5} = 0,90$	$U_{C-ub5} = 0,90$
Вариант (6)	$T_{thr-6} = 6$ мс	$U_{ub6} = 0,91$	$U_{C-ub6} = 0,91$
Вариант (7)	$T_{thr-7} = 7$ мс	$U_{ub7} = 0,92$	$U_{C-ub7} = 0,92$
Вариант (8)	$T_{thr-8} = 8$ мс	$U_{ub8} = 0,93$	$U_{C-ub8} = 0,93$
Вариант (9)	$T_{thr-9} = 9$ мс	$U_{ub9} = 0,94$	$U_{C-ub9} = 0,94$
Вариант (10)	$T_{thr-10} = 10$ мс	$U_{ub10} = 0,95$	$U_{C-ub10} = 0,95$



a)



b)



c)

Рисунок 4 – Оптимальное число SDN-контроллеров и кластеров для Сценария I (a), Сценария II (b), Сценария III (c)

Разработанный CSSA сравнивается с генетическим алгоритмом (GA, аббр. от англ. Genetic Algorithm), алгоритмом PSO и алгоритмом оптимизации «серого волка» (GWO, аббр. от англ. Grey Wolf Optimization). Это самые распространенные алгоритмы, используемые для решения задачи размещения контроллеров в мультиконтроллерных сетях SDN. Они реализованы для ранее представленной случайной сети со 100 OpenFlow-коммутаторами, для указанных трех сценариев в таблице 1. Для такого сравнения рассматриваются две основные метрики: доля отказов в обслуживании со стороны контроллера и использование системы контроллеров в целом. Естественно, что при этом анализируются случаи для различных значений длительности задержки. На рисунках 5 и 6 представлены процент отказов и общее использование системы для каждого алгоритма.

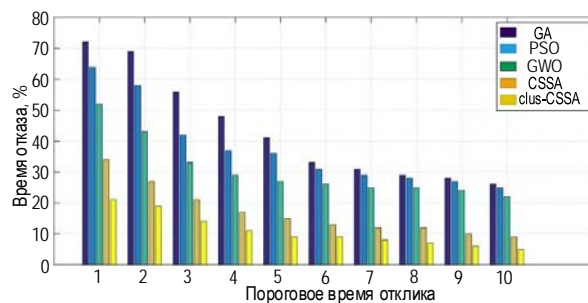


Рисунок 5 – Доля отказов в обслуживании со стороны контроллера при использовании сравниваемых алгоритмов

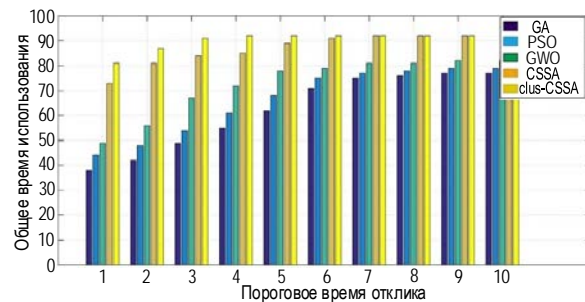


Рисунок 6 – Общее использование системы для сравниваемых алгоритмов

Результаты показывают, что разработанный оптимизированный CSSA достигает более высокой эффективности, чем другие алгоритмы.

Глава 3 посвящена научной проблеме интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Подобные проблемы являются наиболее актуальными сегодня в связи с появлением концепции интегрированных сетей космос-воздух-земля-море. Разработана модель сети, в которой предложено для уменьшения задержки и энергопотребления использовать мобильные серверы граничных вычислений, расположенные на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), а также метод выгрузки трафика с

наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА. При этом процедура выгрузки трафика является трехуровневой, а на окончательных устройствах используется программный профилировщик, который определяет сложность вычисляемой задачи и по результатам его работы механизм принятия решения делает вывод о необходимости выгрузки трафика. Для оптимизации структуры сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности с целью минимизации задержки и энергопотребления при выгрузке трафика с наземной сети на серверы граничных вычислений БПЛА разработан метаэвристический алгоритм на основе хаотического роя салпы. Результаты моделирования показали, что предложенные модель и метод обеспечивают существенное уменьшение задержки и энергопотребления, а также доли заблокированных задач при выгрузке трафика по сравнению с известными решениями.

Разработанная модель сети представлена на рисунке 7. Она включает в себя наземный и воздушный сегменты.

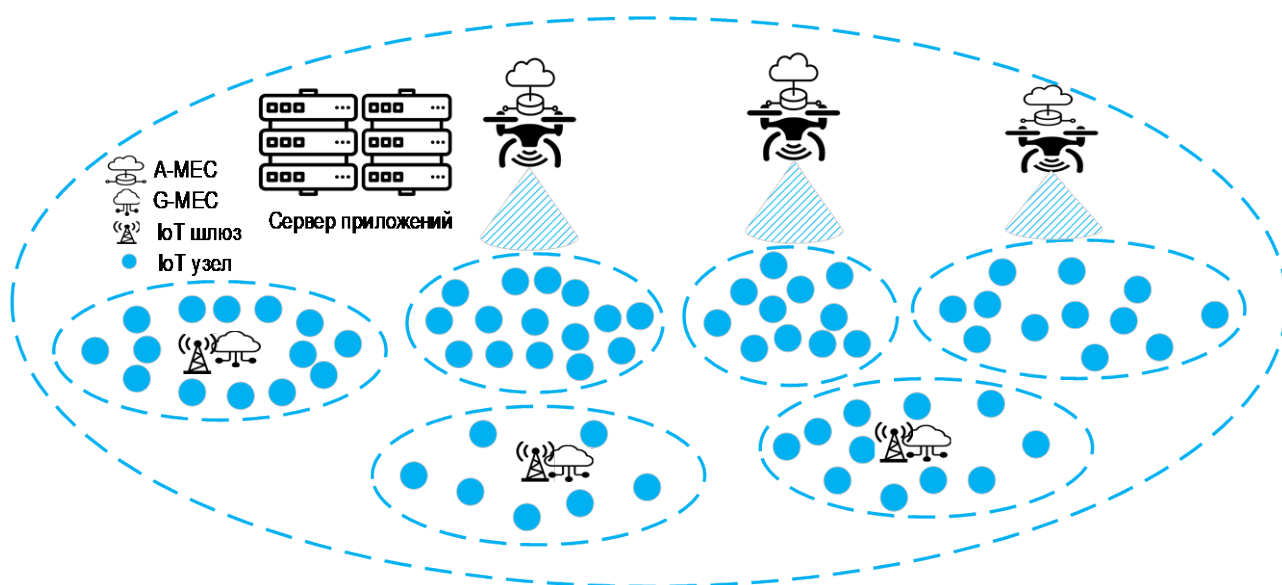


Рисунок 7 – Разработанная модель сети

А) Наземный сегмент

Наземный сегмент представляет собой сеть Интернета вещей с высокой плотностью или сверхвысокой плотностью с распределенными оконечными устройствами. Это четырехуровневая сеть, для обеспечения функционирования которой используется технология распределенных граничных вычислений.

Первый уровень включает в себя распределенные устройства IoT, например, датчики и исполнительные механизмы. Эти устройства используются для измерения параметров окружающей среды. Сценарий высокоплотного и сверхплотного развертывания предполагает, что таких устройств будет очень большое количество, они

могут быть распределены по широкому диапазону областей, поддерживают различные интерфейсы, в том числе интерфейс «воздух-земля» (air-to-ground, A2G) с беспилотными летательными аппаратами БПЛА.

Наземные распределённые серверы граничных вычислений G-MEC (Ground MEC) представляют собой второй уровень такой сети.

Третий уровень образуется шлюзами сети Интернета Вещей. Этот уровень представляет собой интерфейс между оконечными устройствами и облачным сервером сети Интернета Вещей. При этом предполагается, что все шлюзы IoT в рассматриваемой сети подключены и к воздушной плоскости.

Четвертый уровень – это прикладной уровень, а именно: облачный сервер приложений. Все собранные данные передаются через IoT-шлюзы или воздушный сегмент на сервер приложений, где данные анализируются и хранятся. Принятые данные предварительно обрабатываются на оконечных и граничных устройствах, что обеспечивается на основе разработанного метода выгрузки трафика.

Б) Воздушный сегмент

Воздушный сегмент включает в себя множество беспилотных летательных аппаратов, например, микродронов и квадрокоптеров, развернутых для поддержки сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Каждый БПЛА имеет два интерфейса связи: «воздух-земля» A2G (Air-to-Ground) и «воздух-воздух» A2A (Air-to-Air). A2G – это интерфейс, используемый для связи с наземным сегментом, а интерфейс A2A используется для связи между беспилотными аппаратами.

Каждый БПЛА имеет граничный сервер A-MEC (Air MEC) для предоставления вычислительных ресурсов наземной сети. A-MEC представляет собой микро облачный сервер обеспечивающий процедуру выгрузки трафика.

Каждый БПЛА обслуживает кластер оконечных устройств Интернета Вещей. При этом устройства IoT решают присоединиться ли к кластеру узла БПЛА или связаться с IoT-шлюзом на основе индикатора уровня принимаемого сигнала (RSSI). Оконечное устройство IoT решает также к какому БПЛА присоединиться или присоединиться к шлюзу IoT, сравнивая их RSSI.

Рассмотрим разработанный метод выгрузки трафика с наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА. Оконечные устройства IoT обрабатывают данные, используя имеющиеся у них ресурсы, т. е. осуществляется локальное выполнение требуемых задач. Такое решение допустимо только для задач, требующих ограниченных ресурсов, в том числе и энергоресурсов. Задачи, требующие больших ресурсов, следует переносить на граничные серверы наземного сегмента или на граничные мобильные серверы воздушного сегмента. Разработанный метод выгрузки является бинарным, поскольку предполагается, что БПЛА используются только для поддержки высокоплотных и сверхплотных сетей Интернета Вещей и не имеют иных

локальных задач. На рисунке 8 представлен алгоритм реализации разработанного метода выгрузки с указанием основных шагов. Оконечные устройства и блоки МЕС используют ранее разработанную структуру.

БПЛА можно рассматривать как мобильные серверы граничных вычислений, которые получают выгруженные задачи от конечных устройств IoT и либо обрабатывают их сами, либо переносят на другие граничные вычислительные узлы.

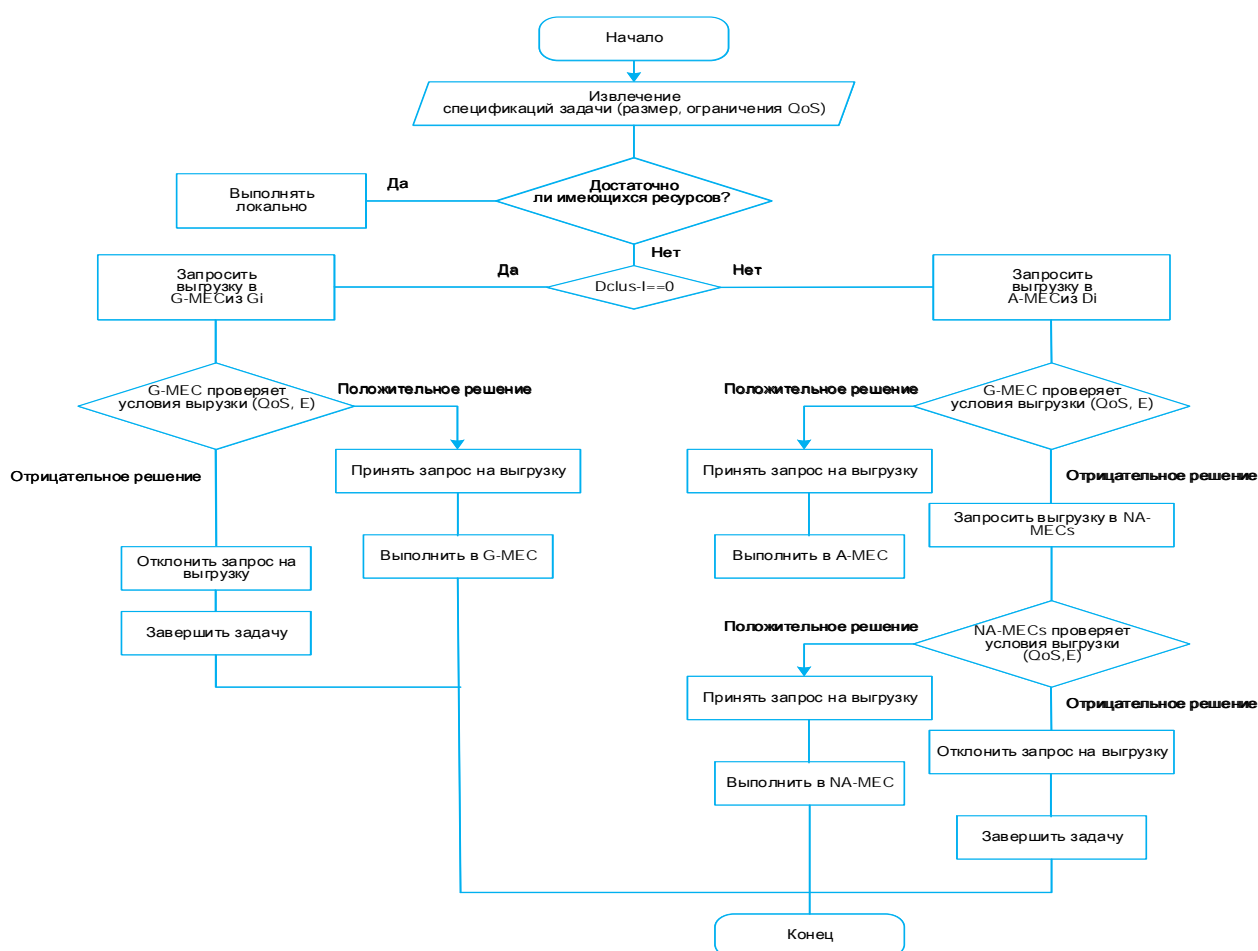


Рисунок 8 – Алгоритм выгрузки трафика для разработанного метода

Разработанные решения были промоделированы в среде NS-3 на основе симулятора LImoSim. Кроме того, в процессе оценки характеристик разработанных решений была использована среда Cloudsim. В качестве наземной сети рассматривалась сеть IoT с 1000 оконечными устройствами и двумя шлюзами, распределенными на площади 25 квадратных километров. Воздушная сеть состояла из четырех БПЛА, находящихся на равной высоте 30 метров.

Чтобы оценить характеристики разработанных решений для архитектуры распределенных граничных вычислений воздух-земля и оптимизированной модели, были рассмотрены четыре системы, которые определяются следующим образом:

- **Система (1):** представляет традиционные сети IoT без поддержки наземных или воздушных граничных вычислений.

- **Система (2):** представляет сеть IoT, поддерживаемую только наземной системой распределенных граничных вычислений. В этой системе развернуты серверы G-MEC.

- **Система (3):** представляет собой сеть IoT с поддержкой распределенных наземных и воздушных граничных вычислений. В этом случае развернуты как серверы G-MEC, так и A-MEC.

- **Система (4):** представляет собой оптимизированную систему воздух-земля. При этом и серверы G-MEC, и серверы A-MEC поддерживают сеть IoT.

Энергопотребление, задержка и доступность для решения вычислительных задач рассматриваются как показатели функционирования систем.

Потребление электроэнергии оценивалось для трех систем: традиционной сети IoT, т. е. системы (1), развитой сети IoT «воздух-земля», т. е. системы (3), и оптимизированной сети IoT «воздух-земля», т. е. системы (4).

На рисунке 9 представлено сравнение среднего энергопотребления в процентах для трех систем при разных значениях числа решаемых задач для каждого конечного устройства. Эти значения были зафиксированы при числе конечных устройств 1000, а задачи относились к категории приложений II (обработка неподвижных изображений). Потребление энергии увеличивается по мере увеличения числа вычислительных задач на конечных устройствах, однако разработанная модель воздух-земля сохраняет энергию для большего числа вычислительных задач по сравнению с традиционными сетями IoT. Предлагаемая модель снижает энергопотребление в среднем на 27 % по сравнению с традиционной моделью IoT. Более того, оптимизированная сеть IoT «воздух-земля» позволяет экономить еще больше энергии. При этом достигается более высокая энергоэффективность в среднем на 6 % по сравнению с моделью «воздух-земля».

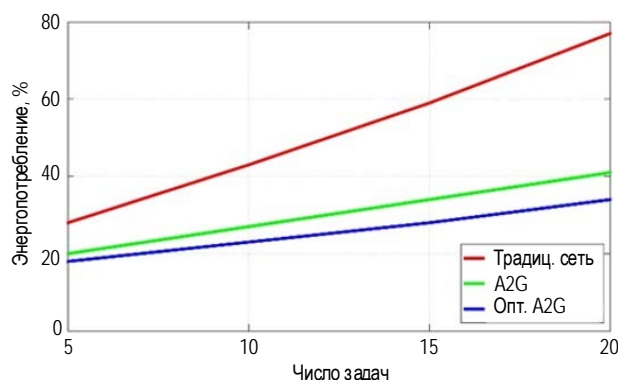


Рисунок 9 – Среднее энергопотребление при разном числе решаемых задач (в процентах от начального значения доступного энергопотребления)

На рисунке 10 показан процент энергопотребления для трех систем в четырех категориях приложений. В данном случае решались вычислительные задачи для разных типов приложений. В процессе оценки исследовались четыре разнородных типа приложений. Первый тип рассматриваемых приложений – это облегченные приложения, которые включают простые задачи, например, такие, которые необходимы для обработки простых веб-страниц. Вторая категория приложений – это приложения на основе неподвижных изображений. Третья категория – это простые видео приложения, которые требуют достаточно простую обработку видео. Четвертая категория включает работу с 360-градусными панорамами и обработкой видео, например, дополненной реальности. При переходе из первой категории в четвертую задачи требуют все более высоких ресурсных возможностей, что снижает вероятность локального выполнения. Очевидно, что энергопотребление для решения задач более высоких категорий выше, чем у более низких категорий.

При этом число развернутых устройств составляло 1000 устройств, а число задач на каждом устройстве равнялось 10. Как видим, разработанная система «воздух-земля» снижает энергопотребление в среднем на 29 % по сравнению с традиционными сетями, в то время как оптимизированная модель позволяет снизить потребление энергии еще на 9%. Можно заметить на рисунке 10, что разработанная система и оптимизированная система позволяют снизить энергопотребление на более высокий процент для приложений с более высокой рабочей нагрузкой, например, категории III и IV.

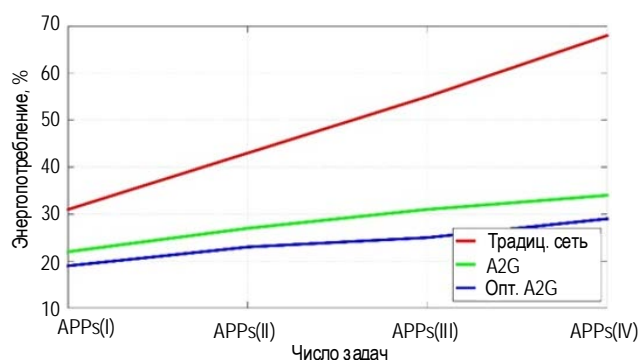


Рисунок 10 – Среднее энергопотребление для различных типов приложений

Влияние плотности расположения оконечных устройств на энергетические характеристики было также проанализировано для трех упомянутых систем. На рисунке 11 показан процент энергопотребления трех систем с разным числом оконечных устройств. Количество оконечных устройств в сети начиналась с 600 и было увеличено до 1200 устройств. Рассматриваемые задачи относились ко второй категории, а число задач на каждом оконечном устройстве равнялось десяти. Разработанная модель «воздух-земля» снизила потребление энергии в среднем на 19 % по сравнению с традиционной сетью, а оптимизированная модель обеспечила снижение

еще на 4%. Для сети с большим числом развернутых оконечных устройств разработанная модель позволяет снизить потребление энергии на 27 % по сравнению с традиционной моделью. Это связано с высокой нагрузкой на наземное исполнение при плотном развертывании традиционной модели.

Отметим, что разработанная схема выгрузки, естественно, снижает общее потребление энергии.

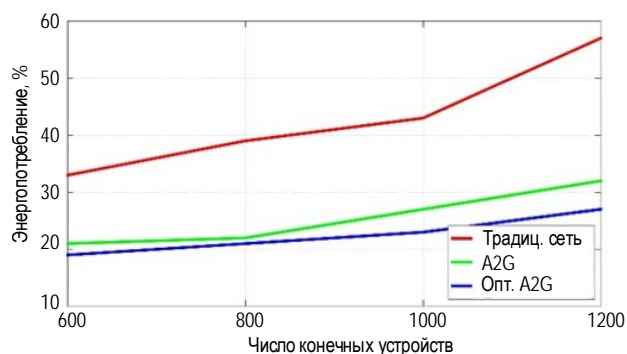


Рисунок 12 – Среднее энергопотребление при различном количестве развернутых узлов

Задержка – важнейший показатель сети, анализируемый в процессе оценки ее функционирования. Средняя задержка обработки рассмотренных вычислительных задач была измерена для ранее упомянутых четырех систем. При этом изменялось число функционирующих устройств, требуемых к решению вычислительных задач и категорий приложений.

На рисунке 13 представлена средняя задержка, необходимая для обработки вычислительных задач в каждой из четырех рассматриваемых систем с изменением числа задач, требуемых для выполнения каждым оконечным устройством. Эти показатели были определены для 1000 оконечных устройств и задач приложений категории II. Разработанная система «воздух-земля», т. е. система 3, обеспечивает более высокую эффективность системы по задержкам, чем традиционные системы без граничных вычислений и системы только с наземными граничными вычислениями. Это повышение эффективности возрастает с увеличением числа вычислительных задач на оконечных устройствах. Внедрение серверов А-МЕС обеспечивает выгрузку вычислительных задач и, таким образом, сокращает общее время, необходимое для обработки этих задач. Более того, разработанная оптимизированная модель обеспечивает дополнительное снижение задержки в среднем еще на 2,5%.

На рисунке 14 показана средняя задержка обработки задач в каждой системе из четырех рассматриваемых систем для четырех категорий приложений. Эти значения были получены для сети с 1000 оконечными устройствами и десятью задачами на каждом оконечном устройстве. Разработанные система «воздух-земля» и оптимизированная система снижают среднюю задержку, необходимую для обработки

вычислительных задач, особенно для задач категории IV. Кроме того, была измерена средняя задержка для четырех систем с разным числом оконечных устройств, результаты представлены на рисунке.

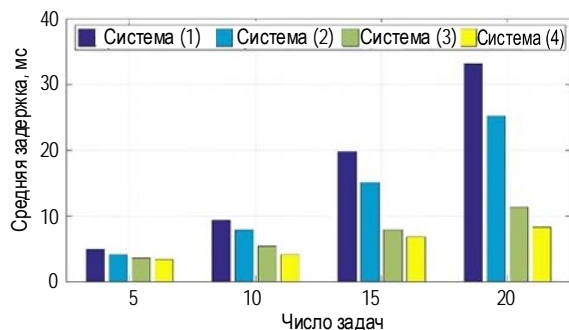


Рисунок 13 – Средняя задержка для четырех систем с разным числом оконечных устройств

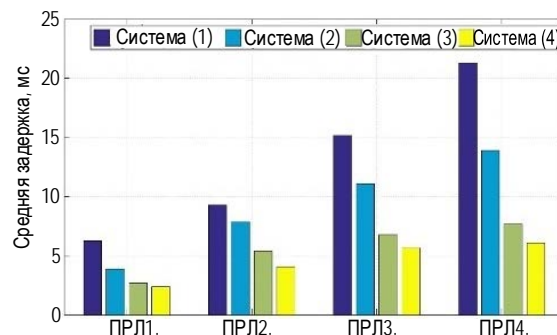


Рисунок 14 – Средняя задержка при различном числе вычислительных задач

На рисунке 15 представлены результаты по заблокированным задачам в процентном соотношении для четырех систем для различных значений и разным числе оконечных устройств. По мере увеличения числа таких устройств увеличивается вероятность блокировки из-за высокой нагрузки на доступные ресурсы. Однако предлагаемые решения, как уже отмечалось выше, обеспечивают дополнительные ресурсы через воздушный сегмент сети.

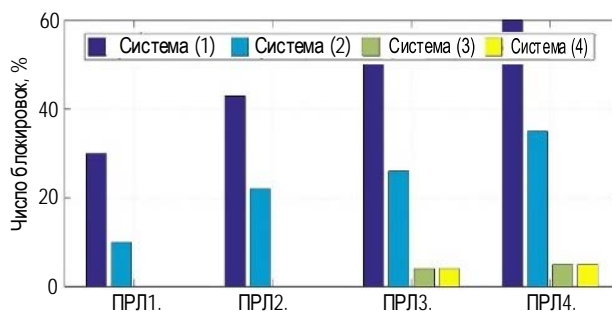


Рисунок 15 – Процентное соотношение заблокированных задач при разном числе оконечных устройств

На рисунке 16 показаны результаты моделирования для четырех систем для различной плотности устройств. Предложенные модель и метод показали более высокую эффективность для значений задержки во всем диапазоне плотности, особенно при высокой плотности наземной сети. Для сетей со сверхвысокой плотностью традиционные модели IoT не могут достичь сверхнизкой или даже низкой задержки. Однако предложенные модель и метод могут поддерживать приложения с ультра малой задержкой даже при сверхвысокой плотности наземной сети.

На рисунке 17 для четырех рассматриваемых систем представлены результаты

моделирования для процента потребляемой энергии при различной плотности наземной сети. Предложенные модель и метод снижают потребление энергии в среднем на 58% по сравнению с традиционными сетями IoT.

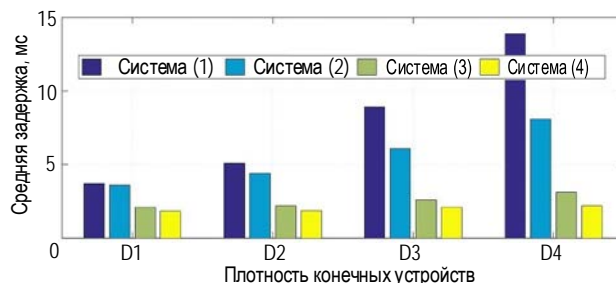


Рисунок 16 – Средняя задержка для различной плотности наземной сети

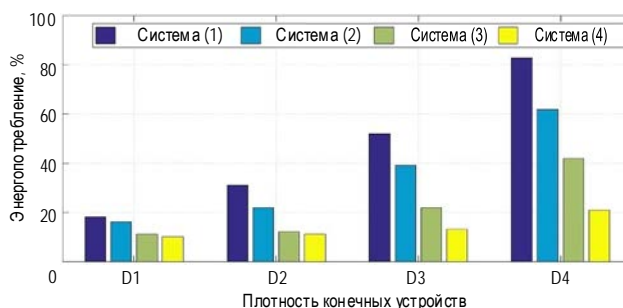


Рисунок 17 – Процент потребление энергии для различной плотности наземной сети

В главе 4 предложена архитектура сети для поддержки беспилотных автомобилей. Разработанная архитектура использует технологии мобильных граничных вычислений (MEC) и программно-конфигурируемых сетей (SDN) для повышения общей надежности сети и ее масштабируемости в условиях высокой плотности трафика. Рассматривается также метод кластеризации для устройств D2D, чтобы обеспечить покрытие сети для централизованно недоступных узлов. Данная архитектура предлагает надежную структуру для поддержки приложений беспилотного транспорта с ультра малой задержкой.

Предлагаемый метод построения сети MEC/SDN. Архитектура такой сети изображена на рисунке 18 В этой архитектуре используются гетерогенные граничные облачные серверы на границе сети доступа. Каждый стационарный RSU подключается либо к граничному серверу, либо к граничному серверу микро-облака, либо к граничному серверу мини-облака на основе многоуровневой граничной структуры для приложений с ультра малой задержкой. Ядро сети построено как мультиконтроллерное. Распределенные коммутаторы OpenFlows с ограниченными вычислительными возможностями развернуты. Развертывание SDN с несколькими контроллерами позволяет сети обслуживать огромный объем трафика без какого-либо снижения производительности, поскольку контроллеры SDN могут переходить в активные или

спящие режимы на основе состояния сети. Кроме того, такая конфигурация системы обеспечивает требуемую масштабируемость сети за счет введения новых контроллеров и граничных серверов в ответ на увеличение сетевого трафика.

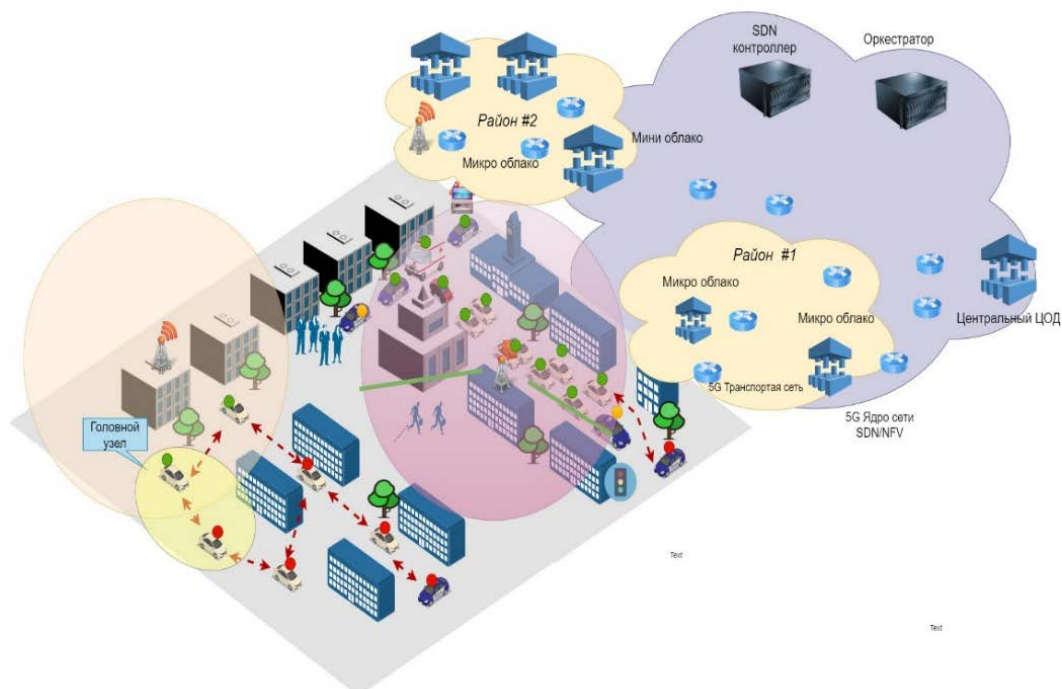


Рисунок 18 – Разработанная архитектура сети

Для оценки производительности архитектуры MEC/SDN были промоделированы сетевые архитектуры для реальных условий. Различные сценарии моделирования были реализованы в Matlab для беспилотных автомобилей с разнородными возможностями. Показатель для оценки производительности представляет собой вероятность блокировки задачи, то есть вероятность того, что задача не будет выполнена. Предполагается, что каждое транспортное средство имеет 10 гетерогенных вычислительных задач, которые должны поступить для обработки одновременно. Было смоделировано три сценария, каждый из которых представляет свою конфигурацию системы. Первый сценарий (А) представляет предлагаемую систему с развертыванием многоуровневой MEC, SDN и кластеризацией на основе D2D. Второй сценарий (В) представляет систему беспилотных автомобилей с развертыванием только технологий MEC и SDN. Сценарий (В) рассматривает развертывание серверов MEC с однородными возможностями, но он не моделирует развертывание D2D и кластеризацию. Последний сценарий (С) представляет собой систему без использования технологий MEC, D2D или SDN. На рисунке 19 представлен процент блокировки задач для каждого сценария моделирования. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая архитектура MEC/SDN обеспечивает повышение производительности на 74 % по сравнению с решением, в котором не используются ни граничные серверы, ни технологии SDN.

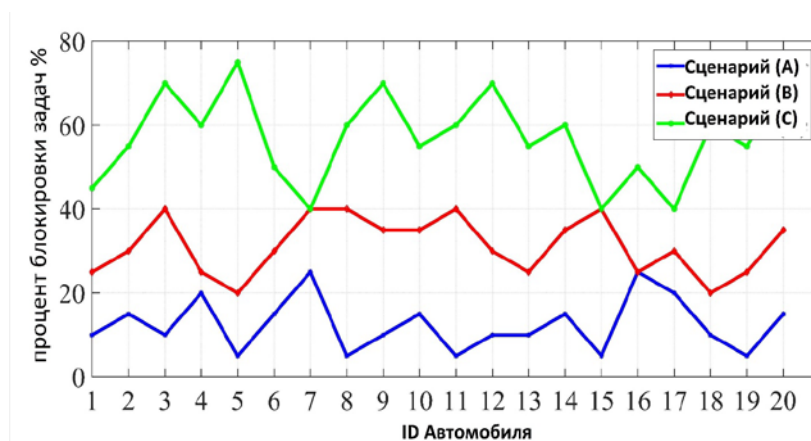


Рисунок 19 – Процент заблокированных задач для трех смоделированных сценариев

В главе 5 исследуется научная проблема создания мобильной SDN, в которые контроллеры SDN устанавливаются на движущиеся объекты, например, автобусы, для обеспечения связи в высокоплотных и сверхплотных сетях 6G. Мобильный контроллер SDN имеет интерфейс с виртуальной машинной версией контроллера SDN на серверах MEC, подключенных к eNB. Система была протестирована на гетерогенных реальных сценариях, полученные результаты подтвердили её дееспособность.

Новый метод развития технологии SDN направлен на обеспечение мобильности контроллера SDN для поддержки сценариев высокоплотных и сверхплотных сетей. Модель сети с мобильным контроллером SDN представлена на рисунке 20. При этом сеть SDN можно рассматривать на трех основных уровнях: централизованные контроллеры SDN, распределенные стационарные контроллеры SDN и распределенные мобильные контроллеры SDN.

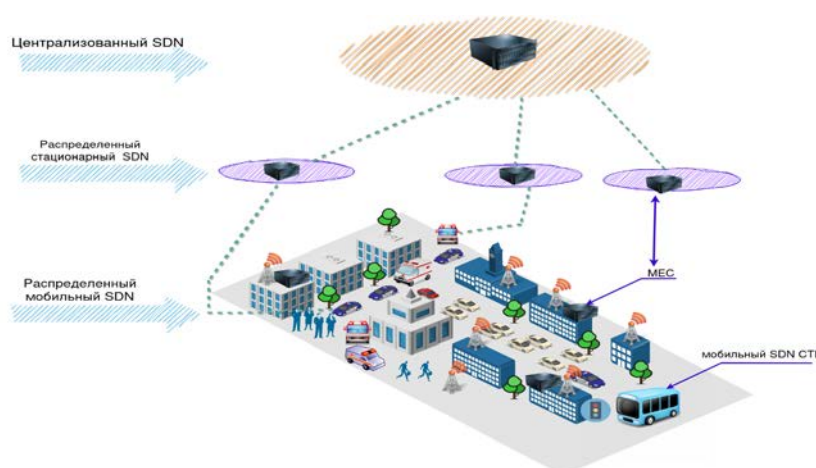


Рисунок 20 – Модель SDN сети

Разработанный метод размещения SDN-контроллеров на мобильных узлах сетей автотранспорта для высокоплотных и сверхплотных сетей 6G с использованием

мобильного SDN-контроллера был смоделирован для оценки производительности. Теперь рассмотрим схему моделирования с основными этапами и параметрами и обсудим результаты моделирования.

Среда моделирования. Предложенная схема мобильного контроллера была оценена в среде симулятора сети NS-3 с симулятором сети Cloudsim.

На рисунке 21 представлены полученные результаты вычисления средней задержки обработки вычислительных задач для рассматриваемых пяти систем. В каждом сценарии конечным пользователям назначалось разное количество вычислительных задач. С увеличением количества назначенных задач средняя задержка, необходимая для их обработки, увеличивалась во всех пяти системах. Это связано с накладными расходами, возникающими из-за увеличения количества доступных вычислительных задач. Однако предложенный метод превзошел все другие и достиг более высокой эффективности, особенно для большего числа доступных задач.

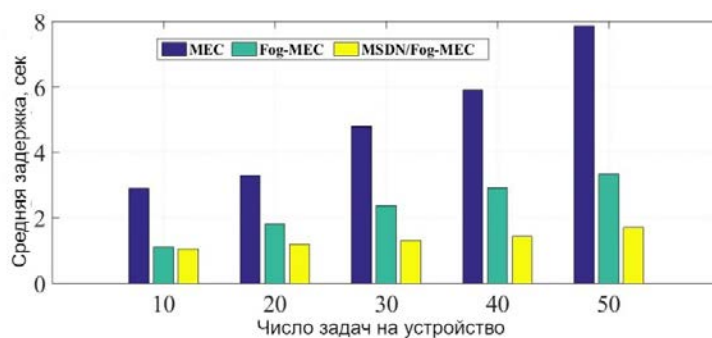


Рисунок 21 – Зависимость средней задержки от количества доступных задач

На рисунке 22 представлены результаты определения средней задержки, необходимой для обработки вычислительных задач, для рассматриваемых пяти систем. Средняя задержка, необходимая для обработки задач, была установлена для ранее упомянутых четырех видов приложений. Развертывание мобильного SDN-контроллера значительно сократило среднее время, необходимое для обработки вычислительных задач различных приложений, особенно для сложных задач с более высокой рабочей нагрузкой.

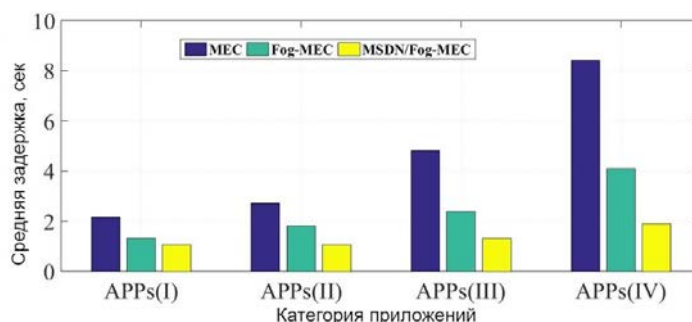


Рисунок 22 – Средняя задержка для различных категорий приложений

Кроме того, была определена задержка для пяти систем при различном количестве развернутых конечных устройств. Результат этого эксперимента представлен на рисунке 23. Средняя задержка увеличивается с ростом числа развернутых узлов из-за увеличения времени ожидания в очереди и коммуникационных накладных расходов. Однако это увеличение минимально для предложенного метода благодаря высокой гибкости сети, обеспечиваемой разработанной архитектурой SDN, которая помогает управлять ресурсами таким образом, чтобы уменьшить накладные расходы и время ожидания в очереди. Подводя итог, можно сказать, что предложенный метод размещения контроллеров в сети SDN снижает среднюю задержку, необходимую для обработки вычислительных задач сети, в среднем на 60% по сравнению с традиционной топологией SDN.

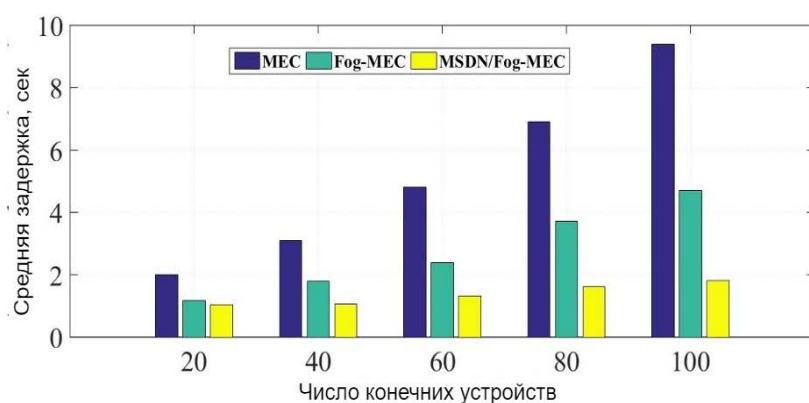


Рисунок 23 – Зависимость средней задержки от количества оконечных устройств

На рисунке 24 представлен процент потребляемой энергии для рассматриваемых пяти систем при различном количестве доступных задач. Видно, что с увеличением числа доступных задач потребление энергии значительно возрастает. Однако предложенный метод, использующий технологию мобильной SDN, управляет потреблением энергии более эффективно и поэтому превосходит по энергетическим показателям другие топологии.

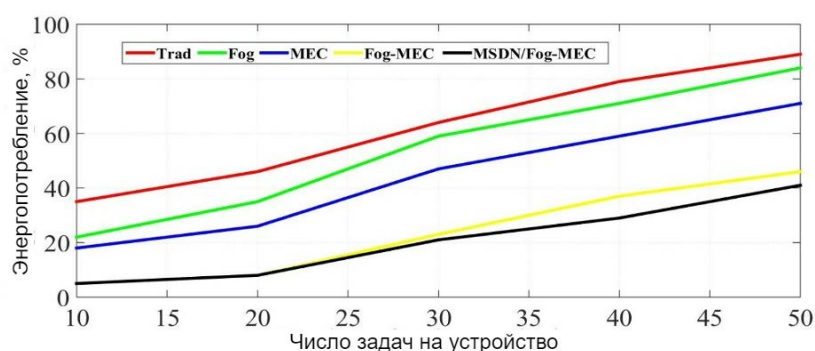


Рисунок 24 – Относительное энергопотребление при разных задачах на устройствах

На рисунке 25 показано потребление энергии в каждой системе для ранее упомянутых четырех видов приложений: использование мобильного контроллера SDN снизило потребление энергии на значительную величину, особенно для сложных задач с более высокой рабочей нагрузкой.

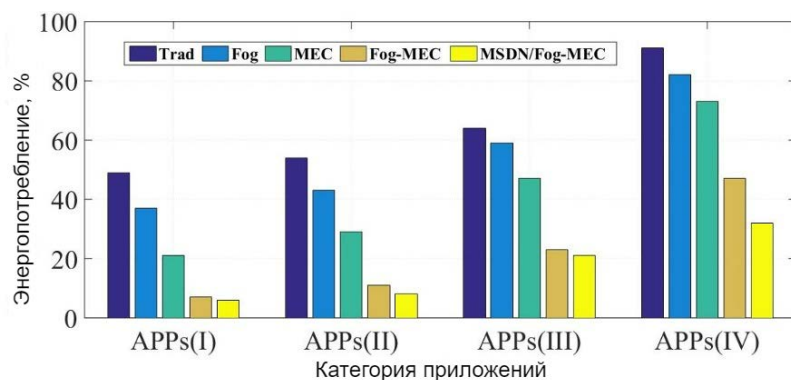


Рисунок 25 – Потребление энергии для различных категорий приложений

Кроме того, было определено потребление энергии для пяти систем при разном количестве развернутых оконечных устройств. Результат – представлен на рисунке 26, где видно, что предложенный метод построения сети SDN снижает среднее энергопотребление в среднем на 72% по сравнению с традиционной топологией SDN.

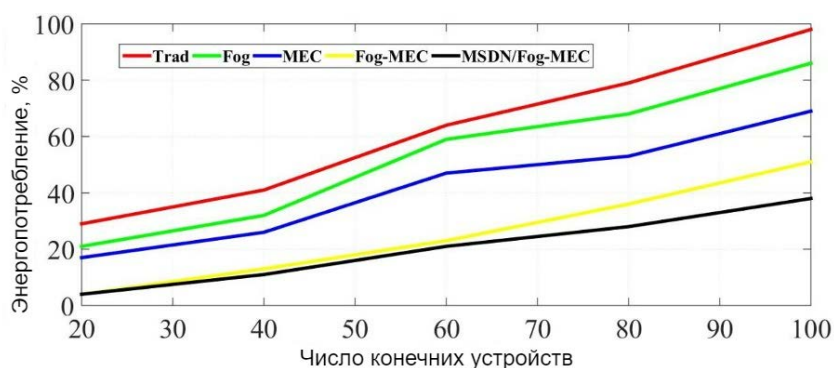


Рисунок 26 – Потребление энергии при различном количестве конечных устройств

Также была определена доля заблокированных задач при разном количестве доступных задач (рисунок 27) и для различных категорий приложений (рисунок 28). Правда, информация о доле заблокированных задач была получена только для четырех систем. Традиционная система отличается высоким процентом блокировок и поэтому в данном сравнении она не рассматривалась. Результаты показали, что с увеличением числа доступных задач вероятность блокировки задачи возрастает из-за нехватки ресурсов, а также длительного времени ожидания в очереди. Задача блокируется, если превышает время, требуемое для ее обработки с заданными характеристиками качества обслуживания. Предложенный метод уменьшает вероятность блокировки в

основном при увеличении количества доступных задач и при высокой плотности расположения узлов. При этом вероятность блокировки уменьшается в среднем на 35 % по сравнению с другими методами.

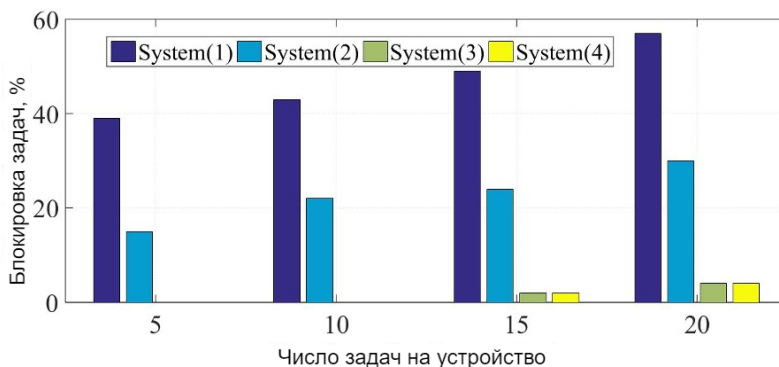


Рисунок 27 – Доля заблокированных задач при различном количестве доступных задач

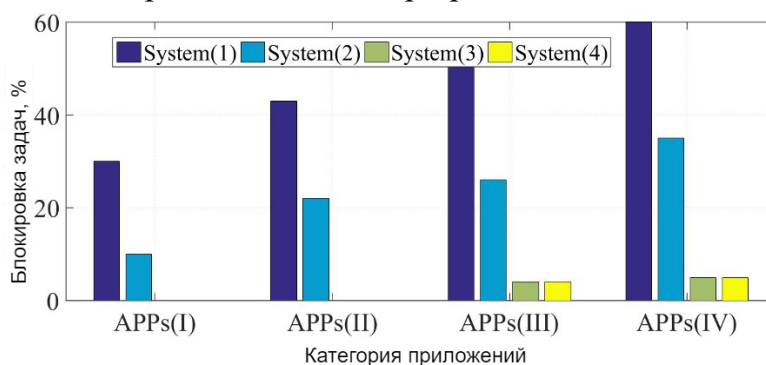


Рисунок 28 – Доля заблокированных задач для различных категорий приложений

Глава 6 посвящена методу прогнозирования трафика в высокоплотных и сверхплотных сетях Интернета вещей.

В главе была предложена архитектура построения сети Интернета вещей, которая представлена на рисунке 29. Сеть состоит из четырех уровней: уровень устройств, уровень распределенных граничных вычислений, уровень сети доступа и уровень приложений. Уровень распределенных граничных вычислений введен между конечными устройствами IoT и сетью доступа для предоставления вычислительных возможностей и энергетических ресурсов в пределах одного транзитного участка. Рассматриваемая технология граничных вычислений представляет собой парадигму туманных вычислений с высокой гибкостью развертывания и уровнем мобильности. Туманные узлы распределяются рядом с конечными устройствами IoT с ограниченными вычислительными ресурсами и низкой мобильностью.

Слой туманных узлов очень востребован в сценариях высокоплотного и сверхплотного развертывания для достижения необходимой доступности и масштабируемости сети. Внедрение туманных узлов облегчает реализацию сетевых алгоритмов и методов, включая методы на основе машинного обучения. Методы и

алгоритмы управления сетевым трафиком, обработки данных и сбора энергии могут быть реализованы и выполняться туманными узлами вместо окончательных устройств IoT. Это позволяет повысить эффективность сети и сэкономить энергию батареи окончательных устройств. Далее рассматриваются проблемы, связанные с массивным сетевым трафиком и перегрузками в высокоплотных и сверхплотных сетях IoT.

Для прогнозирования сетевого трафика в высокоплотных и сверхплотных сетях IoT разработана модель на основе ИИ. Разработанный алгоритм является достаточно простым и может быть реализован на уровне тумана.

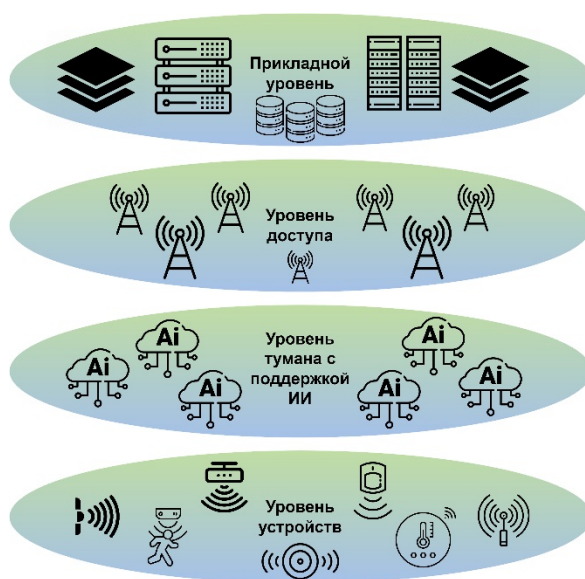


Рисунок 29 – Предложенная архитектура сети IoT

Разработанный метод для прогнозирования трафика основан на сверточной нейронной сети (CNN), которая широко используется в приложениях, основанных на извлечении признаков. Поэтому CNN хорошо подходит для приложений прогнозирования трафика. Разработанная сверточная нейронная сеть CNN - достаточно простая нейронная сеть, которая может быть реализована на распределенных граничных вычислительных узлах, т. е. туманных узлах. Разработанная облегченная CNN для прогнозирования трафика называется LTP-CNN и прогнозирует сетевой трафик в соответствии с текущим состоянием сетевого трафика для заранее определенного интервала времени.

Экспериментальная оценка проводится с использованием библиотек Keras 2.2.0 в среде Python 3.6. Пакеты наборов данных делятся на 90 % для обучения, а остальные 10 % – для тестирования. Для обучения используется 3-кратная кросс-валидация. Разработанная LTP-CNN оценивается с помощью двух рассматриваемых наборов данных, а в качестве метрики эффективности используется точность. Точность LTP-

CNN рассчитывается как процентное отношение суммы истинно положительных T^+ , и истинно отрицательных T^- к общей совокупности, как представлено в (6).

$$Accuracy = \frac{\Sigma T^+ + T^-}{\Sigma T^+ + T^- + F^+ + F^-} \times 100. \quad (6)$$

На рисунках 30–31 представлены результаты точности I набора данных и II набора данных. Результаты показывают, что точность постепенно увеличивается и стабильно составляет около 90 % для обоих наборов данных. Для того чтобы оценить эффективность процесса прогнозирования по сравнению с существующими традиционными CNN, был проведен статистический анализ при сравнении средней квадратической ошибки (MSE) части предсказанных значений LTP-CNN и традиционной CNN. Эти значения представляют собой двадцать реальных предсказанных значений, полученных после применения LTP-CNN и традиционной CNN на туманном узле ранее разработанной тестовой площадки IoT. Статистический анализ был проведен с помощью инструмента GraphPad Prism 5 с использованием t-критерия Стьюдента. Рассматривались два основных сценария: в первом сценарии сравнивалась среднеквадратичная ошибка (MSE) для LTP-CNN, обученной один раз на I наборе данных и другой раз на II наборе данных; в другом сценарии сравнивалась среднеквадратичная ошибка (MSE) прогнозирования LTP-CNN с прогнозированием, полученным в соответствии с традиционным методом.

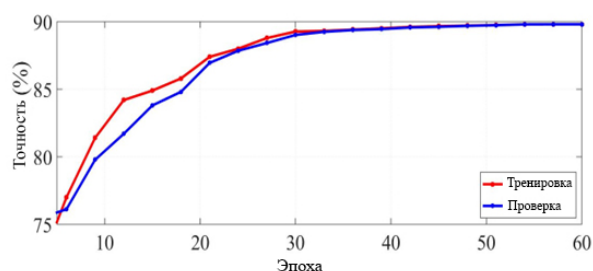


Рисунок 30 – Точность набора данных (I)

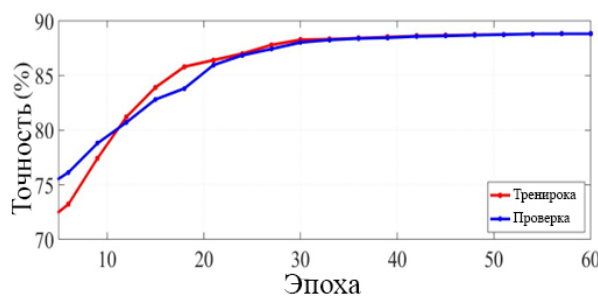


Рисунок 31 – Точность набора данных (II)

На рисунках 32–33 представлены полученные результаты. В первом сценарии результаты показывают отсутствие существенной разницы между среднеквадратичной ошибкой (MSE) для LTP-CNN, обученной на каждом наборе данных, при Р-значении 0,1243. Во втором сценарии результаты показывают, что среднеквадратичная ошибка (MSE) предсказанных данных с использованием LTP-CNN значительно отличается от среднеквадратичной ошибки (MSE) для традиционной CNN сети, при Р-значении 0,0013. Разработанная LTP-CNN достигает меньшего MSE, и, таким образом, предложенный метод прогнозирует с большей эффективностью, чем существующие.

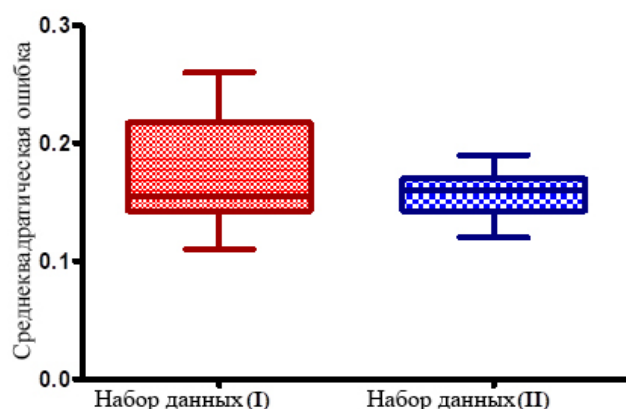


Рисунок 32 – MSE прогнозных значений с помощью LTP-CNN, обученной на наборах данных I и II

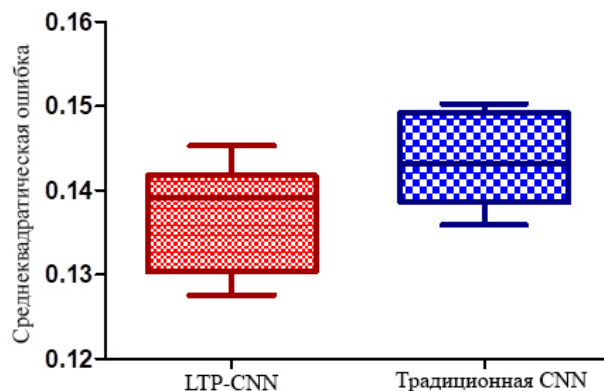


Рисунок 33 – MSE прогнозных значений с использованием LTP-CNN по сравнению с традиционной CNN

Для того чтобы оценить эффективность разработанного метода прогнозирования сетевого трафика с точки зрения реализации, был проведен натурный эксперимент. Разработанная LTP-CNN была реализована на туманном узле на ранее разработанной IoT тестовой площадке. Кроме того, была использована другая существующая работа, использующая традиционную нейронную сеть для прогнозирования трафика. Спецификация и параметры натурального эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – IoT тестовая площадка и параметры экспериментальной установки

Параметр	Значение
Число конечных устройств	300
Узел Интернета вещей	Raspberry pi 3
Fog- Processing	Intel®Xeon®CPU E5-2620v4@2.10 GHz, 32 core
Fog-RAM	64 GB
Fog-HDD	500 GB

На рисунке 34 представлены экспериментальные показатели использования ресурсов узла fog при реализации разработанной LTP-CNN и традиционной нейронной сетью CNN. Здесь представлен процент использования ресурсов хранения для обеих рассматриваемых моделей. Кроме того, представлен процент использования ресурсов обработки. Разработанная модель использует меньше ресурсов хранения в среднем на 21 % и на 18 % меньше ресурсов обработки для реализации разработанного предиктора, чем традиционные существующие предикторы.

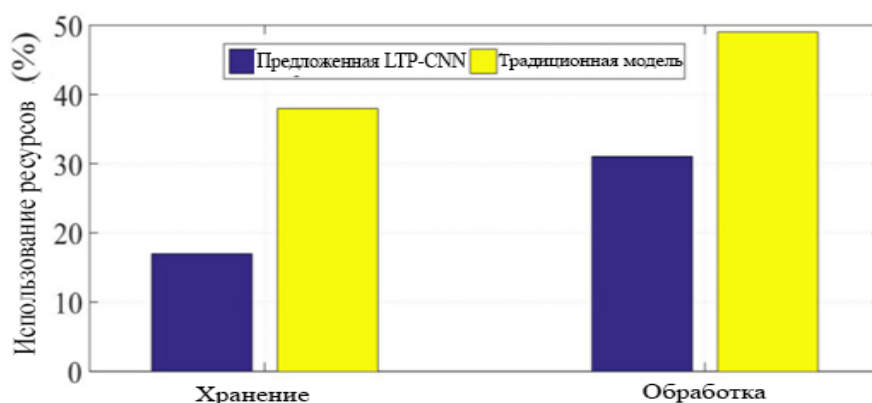


Рисунок 34 – Процент использования ресурсов LTP-CNN по сравнению с традиционной нейронной сетью CNN

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Предложен метод построения мультиконтроллерной сети, основанный на интегральном решении задач по размещению контроллеров в таких сетях, базирующийся на метаэвристическом (вследствие сложности решаемых задач)

алгоритме и алгоритме балансировки нагрузки, позволяющем обеспечить наилучшее использование ресурсов контроллеров.

2. Предложено использовать иерархическую кластеризацию такой сети, включающую в себя кластеры с головными узлами и централизованный контроллер, что обеспечивает балансировку нагрузки в разработанном методе построения сети. В-третьих, разработан модифицированный алгоритм CSSA для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA.

3. Разработанный метод построения мультиконтроллерной сети позволяет уменьшить долю отказов в обслуживании со стороны контроллера и увеличить общее использование системы во всем диапазоне изменения задержки от 1 до 10 мс по сравнению как с широко известными метаэвристическими алгоритмами PSO и GWO, так и с предыдущей версией CSSA. При этом для наиболее сложного случая задержки величиной в 1 мс выигрыш по доле отказов и по общему использованию системы достигает значения более, чем в 2 раза. В дальнейшем планируется реализовать алгоритм CSSA для сети Интернета Вещей высокой плотности.

4. Предложена модель энергоэффективной многопользовательской системы основанной на использовании технологии периферийных вычислений мультисервисного доступа с поддержкой беспилотных летательных аппаратов. Эта система масштабируема и может поддерживать увеличение сетевого трафика без снижения производительности.

5. Развернута сеть беспилотных летательных аппаратов для покрытия мертвых зон и зон с высокой плотностью сети. Кроме этого, беспилотные летательные аппараты могут предоставлять другие приложения в сети «умного города», в которой технология MEC развернута на нескольких уровнях для обеспечения вычислительных возможностей на границе сети. Базовая сеть основана на технологии SDN для возможности гибкого управления сетевым трафиком и предоставления инновационного интерфейса сетевым операторам.

6. Имитационное моделирование демонстрирует, что предложенная в диссертационной работе модель может значительно снизить энергопотребление всей системы.

7. Решена научная проблема, отличающаяся от известных тем, что предложены модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности, основанные на интегральном решении задач по размещению граничных серверов на беспилотных летательных аппаратах и оптимизации структуры сети с использованием мета эвристического алгоритма роя сальп.

8. Для решения научной задачи интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности

разработана модель сети, отличающаяся от известных тем, что предложено для уменьшения задержки и энергопотребления в такой сети использовать мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА, а связь между наземным и летающим сегментом обеспечивать с использованием NOMA.

9. Для решения задачи минимизации задержки и энергопотребления в разработанной модели предложен 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.

10. Для решения научной задачи оптимизации структуры сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности в отличие от известных решений для минимизации задержки и энергопотребления при выгрузке трафика с наземной сети на серверы граничных вычислений БПЛА разработан мета эвристический алгоритм на основе хаотического роя сальп.

11. 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 мета эвристического хаотического роя сальп дает дополнительный выигрыш около 10% по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

12. 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 мета эвристического хаотического роя сальп дает дополнительный выигрыш в 5-10 % по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

13. 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 мета эвристического хаотического роя сальп не дает практически значимого эффекта по сравнению с неоптимизированным алгоритмом.

14. Определены зависимости значений задержки, энергопотребления и доли заблокированных задач по выгрузке трафика.

15. Метод размещения SDN-контроллеров в мульти контроллерных сетях на мобильных узлах сетей VANET для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети

16. 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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. Мутханна А.С. Метод размещения SDN-контроллеров на мобильных узлах сетей VANET для высокоплотных и сверхплотных сетей 6G / А.С. Мутханна // Электросвязь. 2023. № 8. С. 19-27.

2. Мутханна А.С. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности / А.С. Мутханна // Труды учебных заведений связи. 2023;9(3):42-59.

3. Мутханна А.С.А. Интегральное решение проблемы размещения контроллеров и балансировки нагрузки / А.С.А. Мутханна // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 81-93.

4. Мутханна А.С.А. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, С.С. Владимиров, О.И. Ворожейкина, М.В. Захаров, В.Д. Фам, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14-20.

5. Мутханна А.С.А. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G MEGANETLAB СПбГУТ / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.И. Парамонов, С.С. Владимиров, Г.А. Фокин, Р.А. Дунайцев, М.В. Захаров, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5-14.
6. Мутханна А.С.А. Алгоритмы кластеризации для БПЛА в сетях пятого и последующих поколений / А.А. Алзагир, В.Н. Коваленко, А.С. Бородин, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2022. № 10. С. 9-15.
7. Мутханна А.С.А. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений / А.С. Бородин, А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 1. С. 17-22.
8. Мутханна А.С.А. Разработка интеллектуальной системы для управления граничными вычислениями / А.А. Хакимов, А.С.А. Мутханна, А.И. Выборнова // Электросвязь. 2021. № 4. С. 37-42.
9. Мутханна А.С.А. Исследование мультисервисных приложений V2X-сети / А.Г. Владыко, А.А. Хакимов, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 7. С. 17-22.
10. Мутанна М.С. Метод глубокого обучения с подкреплением для систем интернета вещей на базе технологии lora с ограниченными ресурсами и поддержкой QOS / М.С. Мутанна, А.С.А. Мутханна, А.С. Бородин // Электросвязь. 2021. № 8. С. 23-26.
11. Мутханна А.С.А. Система обнаружения и распознавания движущихся биологических объектов для беспилотных автомобилей на основе интеллектуальных граничных вычислений / М.А. Аль-Свейти, А.С.А. Мутханна, А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 9. С. 35-41.
12. Мутханна А.С.А. Применение робастных m-оценок для машинного обучения в сетях VANET / А.Р. Абделлах, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2020. № 5. С. 41-46.
13. Мутханна А.С. Интеллектуальная распределенная архитектура сети связи для поддержки беспилотных автомобилей / А.С.А. Мутханна // Электросвязь. 2020. № 7. С. 29-34.
14. Мутханна А.С.А. Метод выгрузки трафика В V2X/5G сетях на основе системы граничных вычислений / А.Г. Владыко, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2020. № 8. С. 24-30.
15. Мутханна А.С.А. Исследование моделей балансировки нагрузки в программно-конфигурируемых сетях / С. Мухизи, А.С. Мутханна, Р.В. Киричек, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 1. С. 23-29.

16. Мутханна А.С.А. приложения дополненной реальности в «умных городах» / М.А. Маколкина, А.С. Бородин, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 12. С. 44-50.

17. Мутханна А.С.А. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34-40.

18. Мутханна А.С.А. Модели сегментации и кластеризации ресурсов в программно-конфигурируемых сетях / С. Мухизи, А.А. Атея, А.С. Мутханна, Р.В. Киричэк // Электросвязь. 2019. № 4. С. 26-31.

19. Мутханна А.С.А. Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений / М.А. Маколкина, А.А. Атея, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 6. С. 36-42.

20. Мутханна А.С.А. END-TO-END system structure for latency sensitive applications of 5G / A. Ateya, M. Al-bahri, A. Muthanna, A. Koucheryavy // Электросвязь. 2018. № 6. С. 56-61.

21. Muthanna A. The study of semantic gateway performance / V. Kulik, A. Muthanna, V. Pham, A. Hakimov, R.V. irichek, R.Ya. Pirmagomedov // Электросвязь. 2017. № 6. С. 69-73.

22. Мутханна А.С. Исследование перегрузок во всепроникающих сенсорных сетях / А.С. Мутханна, А.И. Выборнова, А.И. Парамонов // Электросвязь. 2016. № 1. С. 53-59.

23. Мутханна А.С. Сравнение протоколов маршрутизации для всепроникающих сенсорных сетей / А.С. Мутханна // Электросвязь. 2014. № 9. С. 5-10.

24. Мутханна А.С. Модели трафика для приложений передачи изображений во всепроникающих сенсорных сетях / А.С. Мутханна, А.В. Прокопьев // Электросвязь. 2013. № 1. С. 28-31.

Работы в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science

25. Ammar Muthanna. Chaotic salp swarm algorithm for SDN multi-controller networks / Ateya, Abdelhamied A., Ammar Muthanna, Anastasia Vybornova, Abeer D. Algarni, Abdelrahman Abuarqoub, Y. Koucheryavy, and Andrey Koucheryavy // Engineering Science and Technology, an International Journal 22, no. 4 (2019): 1001-1012.

26. Ammar Muthanna. Energy-and latency-aware hybrid offloading algorithm for UAVs / Ateya, Abdelhamied A. Ashraf, Ammar Muthanna, Ruslan Kirichek, Mohammad Hammoudeh, and Andrey Koucheryavy // IEEE Access 7 (2019): 37587-37600.

27. Ammar Muthanna Towards optimal positioning and energy-efficient UAV path scheduling in IoT applications / Muthanna, Mohammed Saleh Ali, Ammar Muthanna, Tu

N. Nguyen, Abdullah Alshahrani, and Ahmed A. Abd El-Latif // *Computer Communications* 191 (2022): 145-160.

28. Ammar Muthanna. Optimizing Task Offloading Energy in Multi-User Multi-UAV-Enabled Mobile Edge-Cloud Computing Systems / Alhelaly, Soha, Ammar Muthanna, and Ibrahim A. Elgendy // *Applied Sciences* 12, no. 13 (2022): 6566.

29. Ammar Muthanna. Intelligent and Robust UAV-Aided Multiuser RIS Communication Technique With Jittering UAV and Imperfect Hardware Constraints / Adam, Abuzar BM, Xiaoyu Wan, Mohammed AM Elhassan, Mohammed Saleh Ali Muthanna, Ammar Muthanna, Neeraj Kumar, and Mohsen Guizani // *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023).

30. Muthanna, Ammar A mobile edge computing/software-defined networking-enabled architecture for vehicular networks / Muthanna, Ammar, Regina Shamilova, Abdelhamied A. Ateya, Alexander Paramonov, and Mohammad Hammoudeh. // *Internet Technology Letters* 3, no. 6 (2020): e109.

31. Muthanna A. Development of intelligent core network for tactile internet and future smart systems / Ateya, Abdelhamied A., Ammar Muthanna, Irina Gudkova, Abdelrahman Abuarqoub, Anastasia Vybornova, and Andrey Koucheryavy // *Journal of Sensor and Actuator Networks* 7, no. 1 (2018).

32. Muthanna A. Intelligent transmission control for efficient operations in SDN / Alkanhel, Reem, Abid Ali, Faisal Jamil, Muzammil Nawaz, Faisal Mehmood, and Ammar Muthanna // *CMC-Comput. Mater. Continua* 71, no. 2 (2022): 2807-2825.

33. Muthanna A. Lightweight Deep Learning-Based Model for Traffic Prediction in Fog-Enabled Dense Deployed IoT Networks / Ateya, Abdelhamied A., Naglaa F. Soliman, Reem Alkanhel, Amel A. Alhussan, Ammar Muthanna, and Andrey Koucheryavy // *Journal of Electrical Engineering & Technology* 18, no. 3 (2023): 2275-2285.

34. Muthanna Ammar Advanced deep learning-based computational offloading for multilevel vehicular edge-cloud computing networks / Khayyat, Mashaël, Ibrahim A. Elgendy, Ammar Muthanna, Abdullah S. Alshahrani, Soltan Alharbi, and Andrey Koucheryavy // *IEEE Access* 8 (2020): 137052-137062.