

На правах рукописи

Кузнецов Константин Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
МЕТОДОВ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ
В СЕТЯХ СВЯЗИ ШЕСТОГО ПОКОЛЕНИЯ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

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 руководитель: доктор технических наук,
Мутханна Аммар Салех Али

Официальные
оппоненты: **Карташевский Игорь Вячеславович**,
доктор технических наук, доцент,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, научно-
исследовательская лаборатория «Инновационные
проекты», заведующий лабораторией

Степанов Михаил Сергеевич ,
кандидат технических наук, доцент,
Московский технический университет связи и
информатики, кафедра сетей связи и систем
коммутации, доцент кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 27 ноября 2024 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 27 сентября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. За последние 20 лет в сфере развития сетей связи произошел значительный прогресс. Появилось множество новых технологий, которые сначала позволили предоставлять пользователям широкий спектр услуг, включая развитие мобильной телефонии, затем они обеспечили возможность передачи данных и видео, а сейчас уже привели к изменениям в принципах построения сетей и в услугах, доступных для пользователей. 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 ультрамалыми задержками. Все это вместе взятое потребовало комплексного использования ресурсов всевозможных сетей и преобразовало сети связи из гомогенных в гетерогенные.

В начале третьего десятилетия 21 века стало ясно, что нескоординированное развитие мобильных и фиксированных сетей связи не способствует решению проблемы интегрирования всех ресурсов всех сетей для предоставления современных услуг всем пользователям сетей связи общего пользования и на этапе формирования подходов к реализации сетей связи шестого поколения 6G появилась новая концепция развития сетей связи, в основе которой лежит понимание необходимости интеграции не только разнообразных технологий в рамках тех или иных сетей, но и интеграции различных видов сетей связи в единую сеть.

В диссертационной работе исследуются методы и модели построения сети связи на основе программно-конфигурируемых сетей и беспилотных летательных аппаратов для реализации услуг телеприсутствия в сетях связи шестого поколения.

Исследования проводятся с использованием модельно-методического аппарата, позволяющего повысить эффективность построения сетей беспроводного доступа с применением БПЛА, метод построения ядра сети на основе программно-конфигурируемых сетей для реализации услуг телеприсутствия. С учетом изложенного тема диссертационной работы представляется актуальной.

Разработанность темы исследования. Существует множество работ в области сетей 5G и последующих поколений, высокоплотных и сверхплотных

сетей, сетей связи с ультрамалыми задержками как теоретического, так и экспериментального плана. Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования этих научных проблем внесли российские и зарубежные ученые: В.М. Вишнеvский, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, Б.С. Гольдштейн, С.Н. Степанова, Т.М. Татарниковой, И.В. Карташевский, А.И. Парамонов, А.Е. Кучеряvый, Е.А. Кучеряvый, 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.

Работы отмеченных выше авторов внесли весомый вклад в исследования характеристик сетевого трафика и качества обслуживания для сетей связи пятого и шестого поколений, в основном для услуг Интернета Вещей, передачи данных, видео, телеконференций и т.п. Однако до настоящего времени практически не уделялось внимания исследованию характеристик трафика и качества обслуживания для услуг телеприсутствия и методам их реализации сети связи с ультрамалыми задержками. Это и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. При этом решается следующая *научная задача*: исследование и разработка методов обеспечения услуг телеприсутствия в сетях связи шестого поколения.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются сети связи пятого и последующих поколений. Предметом исследования являются модели и методы реализации услуг телеприсутствия в сетях связи шестого поколения.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является подготовка модельно-методической базы для реализации услуг телеприсутствия в сетях связи шестого поколения.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ существующего положения в области исследования сетей связи пятого и последующих поколений, роли и места программно-конфигурируемых сетей, сетей с применением БПЛА и услуг телеприсутствия в развитии сетей и систем связи.

2. Анализ существующего положения дел в области исследований мета и мультивселенных, а также костюмов телеприсутствия как интерфейса между вселенными и пользователями.

3. Разработка метода получения оптимального распределения коммутаторов относительно SDN-контроллеров, которое минимизирует нагрузку на каждый контроллер.

4. Разработка метода размещения маршрутизаторов сети на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и обеспечения маршрутизации с помощью роя БПЛА.

5. Разработка метод реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого и шестого поколений.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен метод оптимизации числа контроллеров в мультиконтроллерных сетях SDN, который позволяет снизить среднее число контроллеров на 46% за счет динамического управления, что уменьшает энергопотребление и затраты на развертывание, а также повышает надежность сети.

2. Разработан модельно-методический аппарат, позволяющий повысить эффективность построения сетей беспроводного доступа с применением БПЛА, в частности позволяющий выбирать позиции размещения маршрутизаторов в рое БПЛА и логическую структуру сети. Разработанный модельно-методический аппарат решает задачу маршрутизации трафика с учетом качества его обслуживания.

3. Предложен метод передачи языка жестов, как элемент костюма телеприсутствия для людей с ограниченными возможностями.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке новой модели и метода, которые позволяют произвести распределение маршрутизаторов (точек доступа) сети, размещенных на БПЛА с учетом качества обслуживания и обеспечения построения связанной mesh-сети и ее связи с сетью подвижной связи, которые могут быть использованы как в современных, так и перспективных сетях связи; предложен метод реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого и шестого поколений.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в разработке методики планирования мультиконтроллерных сетей на основе программно-конфигурируемых сетей SDN, внедренной в ПАО «ТИПРОСВЯЗЬ», предложенной модели и методах, которые могут быть использованы при

организации обслуживания в сетях 5G и последующих поколений, в частности, они позволяют обеспечить доступность связи и оперативность организации сети в случаях недостаточного покрытия, а также в случаях выхода из строя отдельных элементов сети.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «ТИПРОСВЯЗЬ» при разработке методики планирования мультиконтроллерных программно-конфигурируемых сетей SDN, в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при проведении работ по Мегагранту «Исследования сетевых технологий с ультрамалой 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.

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 интеллектуального ядра интегрированной сети 6G на основе технологии SDN для услуг телеприсутствия, снижающий среднее число контроллеров в мультиконтроллерных сетях SDN на 46% и увеличивающий при этом эффективность использования контроллеров на 53%.

2. Модель и методы размещения маршрутизаторов сети на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и обеспечения маршрутизации с помощью роя БПЛА, позволяющие увеличить эффективность использования сети на 50%.

3. Метод реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого и шестого поколений, позволяющий в режиме реального времени передавать жестовую речь, и требования к качеству обслуживания и качеству восприятия таких услуг.

Достоверность результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурального и имитационного моделирования, а также

спектром публикаций и выступлений как на российских, так и международных научно-технических конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены на следующих конференциях, конгрессах и семинарах: Международной конференции по проводным и беспроводным сетям и системам следующего поколения NEW2AN (Дубай, 2023); Международной конференции “Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисления, связь” DCCN (Москва, 2023); Международной научно-технической и научно-методической конференции “Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании” АПИНО (Санкт-Петербург, 2020, 2022); Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 2024).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 11 опубликованных работах, в том числе в 2 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 2 работах в изданиях, включенных в международные базы цитирования; 7 работах других научных изданий и материалов конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 2, 4, 9, 10 и 12.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работы содержит 140 страницы машинописного текста, 40 рисунков, 3 таблиц и список литературы из 91 наименования.

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 существующих изысканий в области сетей шестого поколения, роли и места программно-конфигурируемых сетей SDN, сетей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также методов миграции сетевых функций. Рассматривается архитектура интегрированной сети связи SAGIN (рисунок 1), особенности ее применения при взаимодействии с метавселенными, представлены требования к качеству услуг телеприсутствия.

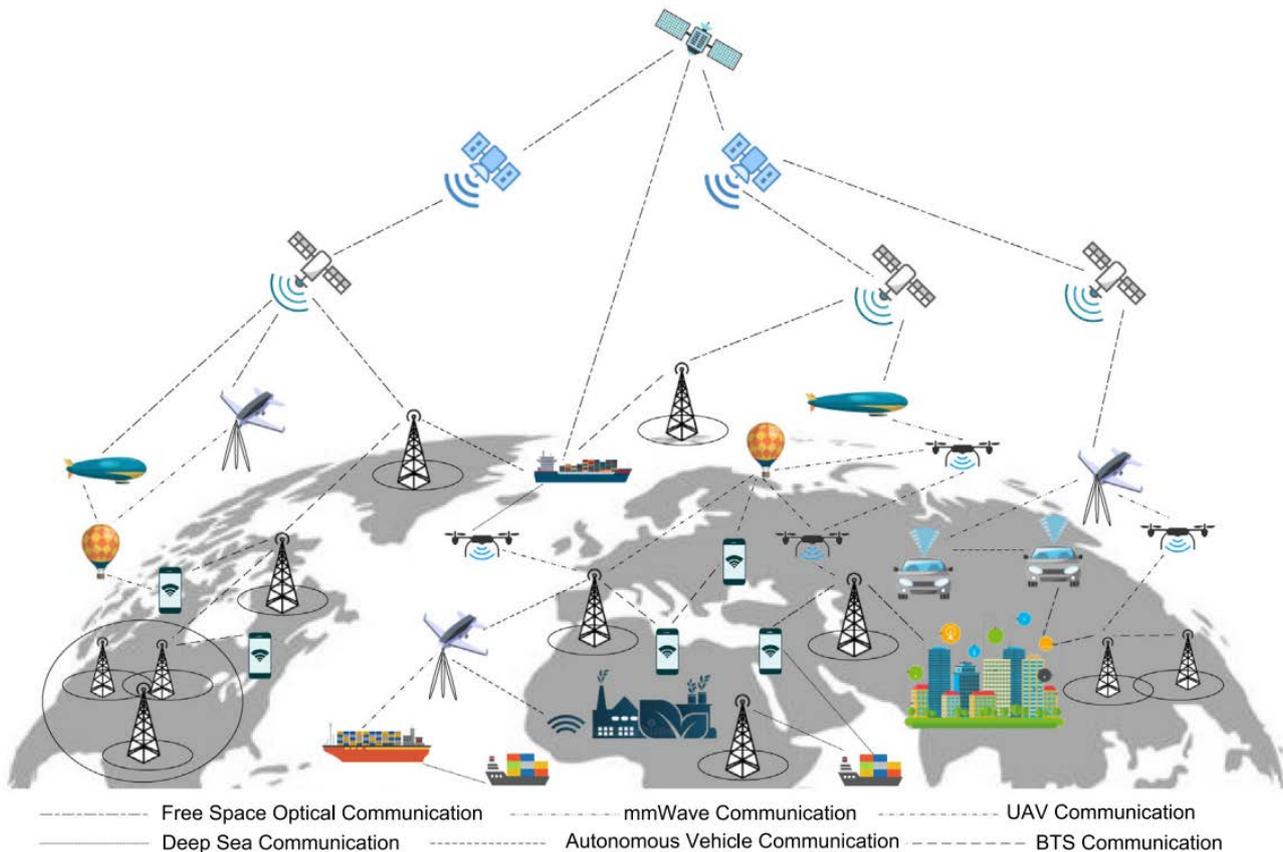


Рисунок 1 – Архитектура SAGIN

Во второй главе в качестве одного из элементов достижения поставленных требований к качеству передачи данных предлагается рассмотреть и протестировать мультиконтроллерную программно-определяемую архитектуру сети (рисунок 2), которая позволит рационально использовать

имеющиеся вычислительные ресурсы, а также сравнить ее эффективность с традиционными архитектурами.



Рисунок 2 – Общая архитектура

Задача эксперимента – динамический поиск оптимального количества SDN-контроллеров, при котором достигается минимальная задержка связи между распределенными OpenFlow-коммутаторами и SDN-контроллерами и минимальная стоимость сети. Это оптимальное число динамически изменяется при изменении нагрузки на сеть. Кроме того, задача направлена на определение оптимальных связей между коммутаторами и контроллерами SDN таким образом, чтобы достичь целей минимальной задержки и стоимости. Также задача направлена на получение оптимального распределения коммутаторов относительно SDN-контроллеров, которое минимизирует нагрузку на каждый контроллер.

Задача оптимизации представляет собой функцию минимизации, которая направлена на уменьшение общего количества SDN-контроллеров в сети (N_T), общего числа SDN-контроллеров на кластер (N_C), общей стоимости SDN-контроллеров (C) и средней задержки от каждого SDN-контроллера до подключенных OpenFlow-коммутаторов (D). Целевая функция выглядит при этом следующим образом:

$$\text{Min } f(N_T, N_C, C, D),$$

Ограничения:

$$T_j \leq T_{\text{thr}}, \quad \forall C_i \in C,$$

$$U_{\text{lb}} \leq U_i \leq U_{\text{ub}}, \quad \forall C_i \in C,$$

$$U_{C-\text{lb}} \leq U_C \leq U_{C-\text{ub}},$$

где T_i – i -ое время отклика контроллера; T_{thr} – пороговое время отклика; C_i – i -ый контроллер; U_{lb} – нижний предел утилизации SDN контроллера; U_{ub} – верхний предел утилизации SDN контроллера; $U_{C-\text{lb}}$ – нижний предел утилизации контроллеров кластера SDN; $U_{C-\text{ub}}$ – верхний предел утилизации контроллеров кластера SDN; U_C – средняя загрузка кластера контроллеров SDN.

Проведена оптимизация числа контроллеров и их распределения в мультиконтроллерных сетях SDN на основании методики, базирующейся на параметрической оптимизации. Этот подход учитывает динамические изменения сетевого трафика и позволяет достичь следующих целей:

- минимизация задержек;
- снижение энергопотребления;
- уменьшение затрат на развертывание;
- повышение надежности сети;
- снижение вычислительной сложности.

На рисунке 3 показано среднее число контроллеров для традиционного метода и метода, предлагаемого в данной статье. Здесь рассматривается десять значений каждого параметра, а каждое значение представляет собой вариант моделирования. Рассматриваемые параметры моделирования представлены в таблице.

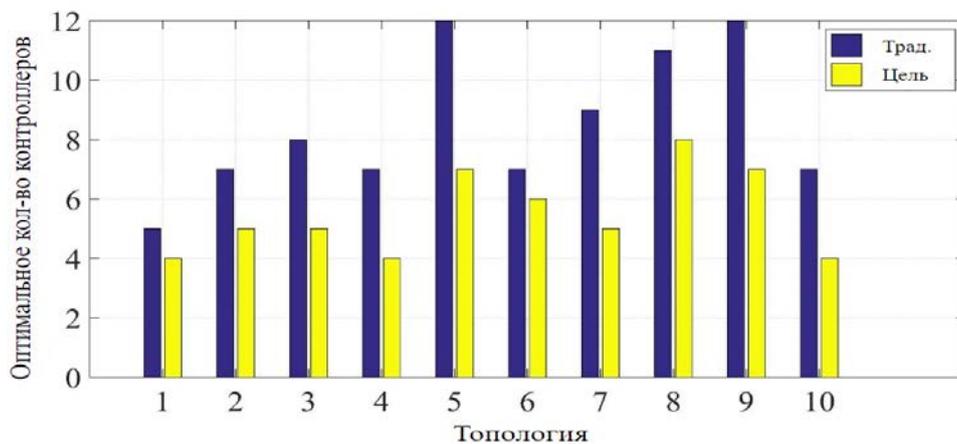


Рисунок 3 – Графическое представление оптимального числа контроллеров

Из рисунка 3 видно, что:

- в традиционном методе заранее определено фиксированное число контроллеров независимо от нагрузки;
- предложенный метод снижает среднее число контроллеров в сети на 46% за счет динамического управления, что значительно уменьшает эксплуатационные затраты.

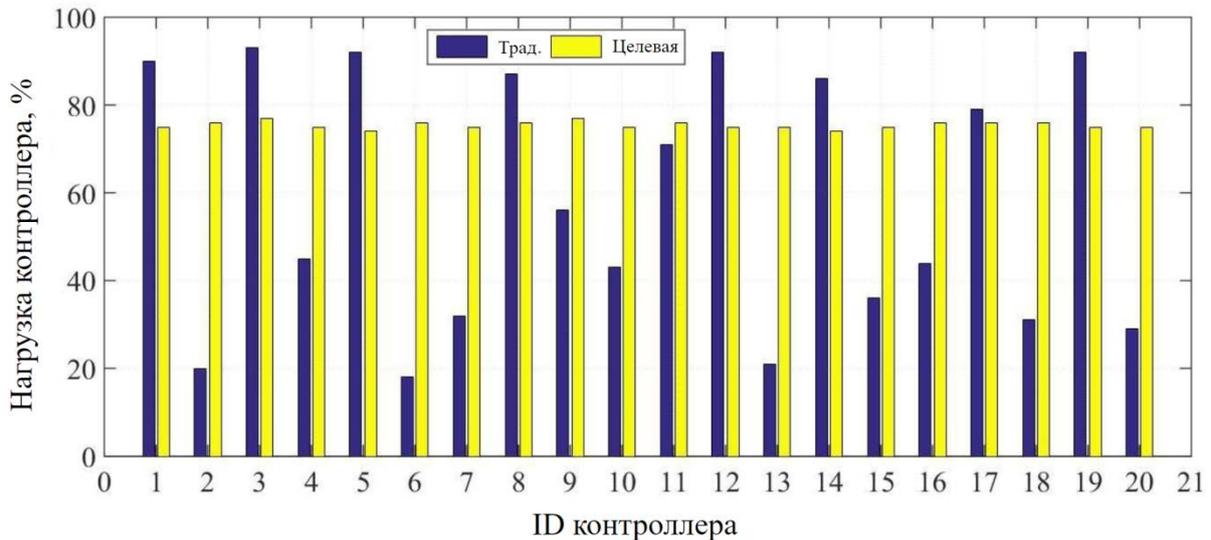


Рисунок 4 – Загрузка контроллеров

Из рисунка 4 видно, что:

- традиционный метод может демонстрировать эффект простаивания контроллеров из-за фиксированного распределения ресурсов;
- для предложенного метода загрузка контроллеров в среднем выше, что объясняется оптимизацией построения сети и избавлением от эффекта простаивания. Контроллеры работают более эффективно, обрабатывая большее количество запросов, что улучшает общую производительность сети;
- предложенный метод позволяет минимизировать эффект простаивания контроллеров из-за неэффективного распределения ресурсов, а также равномерно распределить нагрузку между контроллерами, при этом средняя нагрузка на контроллер возрастает на 53%, но не превышает оптимального значения загрузки вычислительных ресурсов в 80%.

Разработан метод повышения эффективности использования сетевых ресурсов интегрированной сети 6G, учитывающий особенности трафика при реализации услуг телеприсутствия. Основные результаты работы:

1. Предложенный метод оптимизации числа контроллеров в

мультиконтроллерных сетях SDN демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционным методом. Он снижает среднее число контроллеров на 46% за счет динамического управления, что уменьшает энергопотребление и затраты на развертывание, а также повышает надежность сети.

2. Предложенный метод на 53% повышает эффективность использования контроллеров, за счет динамического распределения нагрузки между ними в мультиконтроллерных сетях SDN, тем самым значительно сокращая расходы на развертывание сети.

В главе 3 описывается разработанный модельно-методический аппарат, позволяющий повысить эффективность построения сетей беспроводного доступа с применением БПЛА, в частности позволяющий выбирать позиции размещения маршрутизаторов в рое БПЛА и логическую структуру сети.

При работе в перспективных сетях на частотах субмиллиметрового диапазона нужно обеспечить достаточно малое расстояние и прямую видимость между маршрутизатором и антенной базовой станции. Одним из способов достижения этого является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В данной работе предлагается метод применения БПЛА или группы БПЛА для размещения маршрутизаторов и организации обслуживания пользователей, находящихся в сложных условиях для приема сигналов сети. В общем случае, при размещении маршрутизатора на БПЛА необходимо решить задачу выбора точки его размещения. При этом возможны варианты, когда БПЛА является неподвижным, например, привязанным и когда БПЛА может перемещаться как относительно пользователей, так и относительно других БПЛА.

Условная модель сети приведена на рисунке 5. На рисунке показаны одиночный БПЛА и группа (рой) БПЛА. Маршрутизатор, размещенный на одиночном БПЛА, выполняет роль точки доступа, обслуживая пользователей в своей зоне связи. Маршрутизаторы, размещенные на БПЛА роя организованы в mesh (ячеистую) сеть. Один или несколько маршрутизаторов из этой группы могут взаимодействовать с базовыми станциями сети подвижной связи. Маршрутизаторы в «рое», в зависимости от условий, могут выполнять ряд функций: связь с базовой станцией сети подвижной связи, связь с другими маршрутизаторами группы, связь с пользователями.

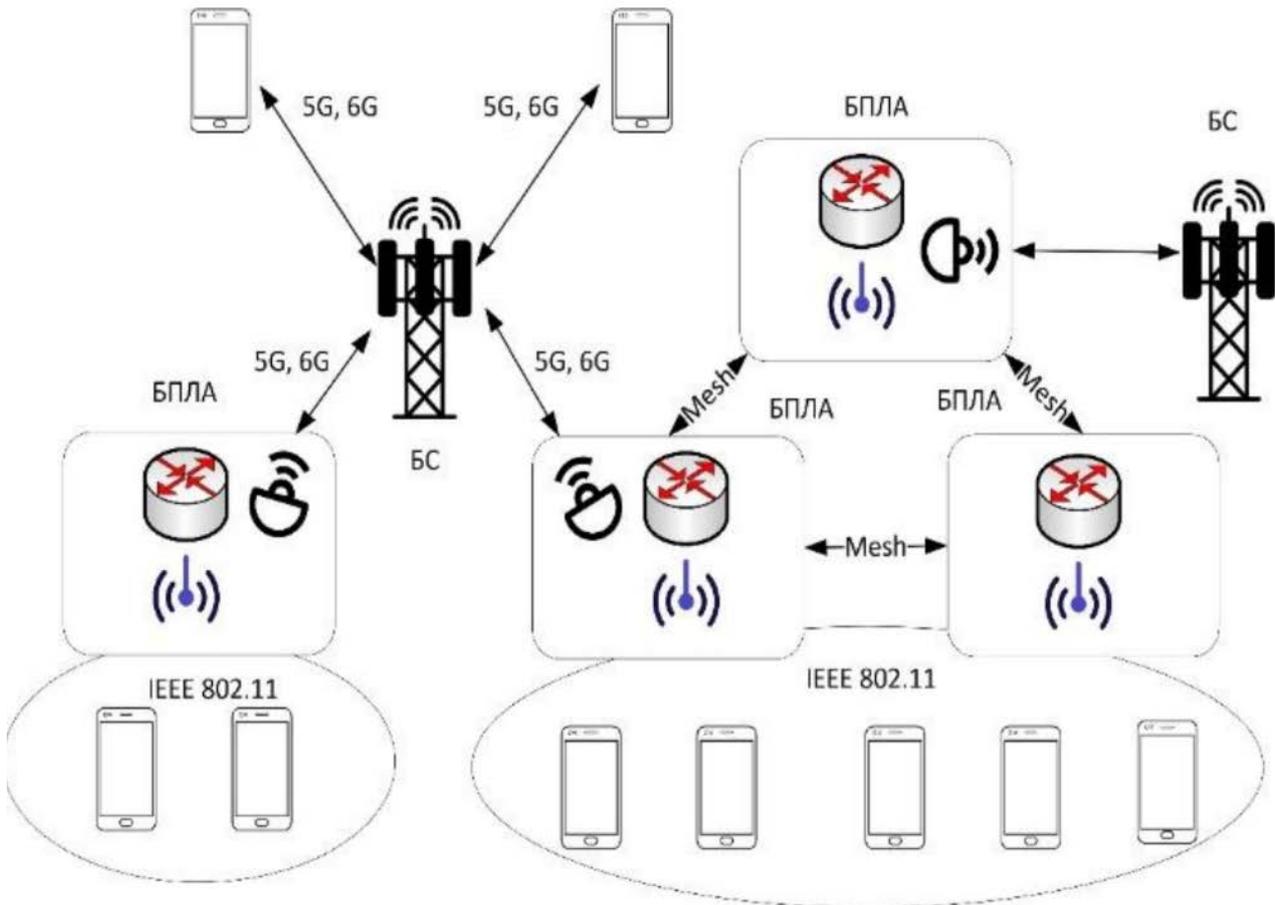


Рисунок 5 – Модель сети с использованием БПЛА

Предлагается алгоритм, построенный на основе алгоритма кластеризации FOREL.

Применение выбранного подхода кластеризации решает задачу минимизации суммы расстояний между элементами и центрами кластеров. При описании системы приведенными выше выражениями целевая функция кластеризации будет выражаться как:

$$O = \max_{c_j, j=1 \dots n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} b(c_j, u_{ji})$$

где $b(c_j, u_{ji}) = b(d(c_j, u_{ji}))$ достижимая скорость передачи между центром j -го кластера и i -м элементом j -го кластера, $d(c_j, u_{ji})$ расстояние между центром j -го кластера и i -м элементом j -го кластера.

Таким образом, применение данного метода позволяет выбрать позиции центров кластеров (позиций точек доступа) так, чтобы суммарная скорость передачи в сети была максимальна, при этом заданное условие обеспечивает минимально допустимую величину скорости передачи данных.

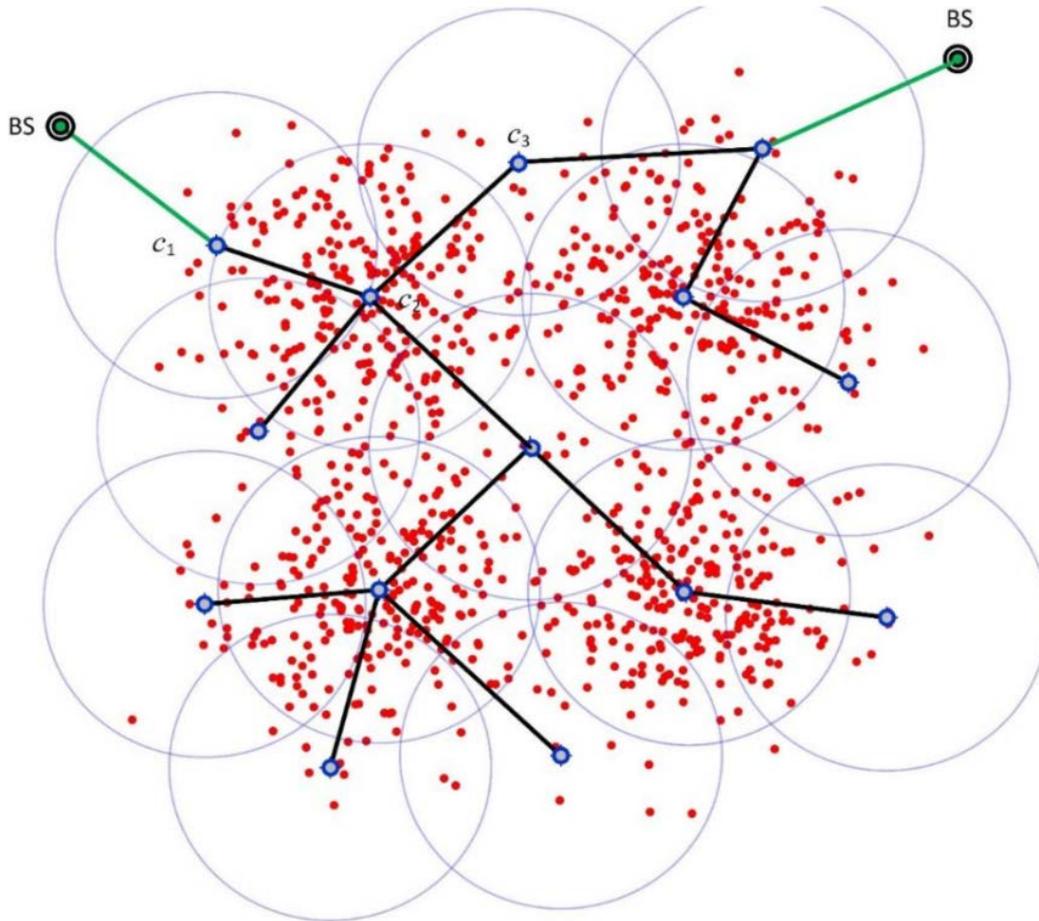


Рисунок 6 – Результат кластеризации и выбора структуры сети

После выполнения алгоритма будут найдены центры кластеров. На этом алгоритм может быть завершен, а элементы могут быть отнесены к кластерам в том порядке, в котором выделялись кластеры в ходе выполнения алгоритма. Однако, такой подход дает хорошие решения в случае наличия скоплений элементов (пользователей), причем размер этих скоплений не превышает размера кластера R . В противном случае размеры кластеров могут сильно отличаться.

В таком случае целесообразно по завершении алгоритма выполнить перераспределение элементов путем отнесения их к ближайшим центрам кластеров. В приведенном выше алгоритме эта операция выполняется процедурой `ReDistributeNones(y/n)`, аргумент `y/n` показывает имеет смысл выполнять операцию перераспределения или нет.

После операции перераспределения элементов кластеры будут иметь форму многогранников, стороны которых определяются диаграммой Вороного, построенной относительно найденных центров кластеров, пример на рисунке 7.

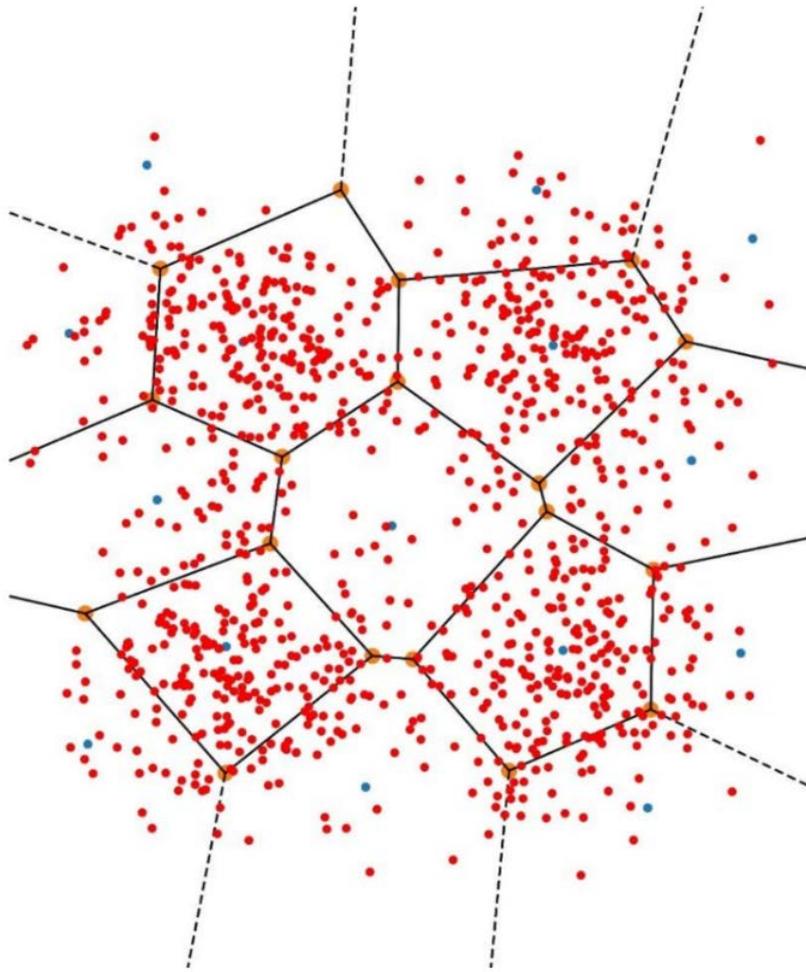


Рисунок 7 – Результат модификации формы кластеров

Предложенный метод и алгоритм позволяют произвести кластеризацию пользователей в заданной зоне обслуживания с учетом допустимых расстояний между центрами кластеров и допустимых расстояний до базовых станций сети подвижной связи. Благодаря этим качествам данный метод позволяет построить связную mesh сеть на основе маршрутизаторов, размещаемых в центрах кластеров, имеющую связь с базовыми станциями сети подвижной связи. Алгоритм кластеризации обеспечивает выделение кластеров по максимуму качества обслуживания.

Для оценки эффективности предложенных методов, в качестве альтернативы, выбран не модифицированный алгоритм FOREL. При его применении распределение маршрутизаторов в зоне обслуживания не гарантирует связности mesh сети и доступности сети подвижной связи. Позиции маршрутизаторов в таком случае случайны и зависят от распределения пользователей, но никак не ограничены в части взаимного расположения. В

таком случае, связность образуемой ими сети также является случайной величиной.

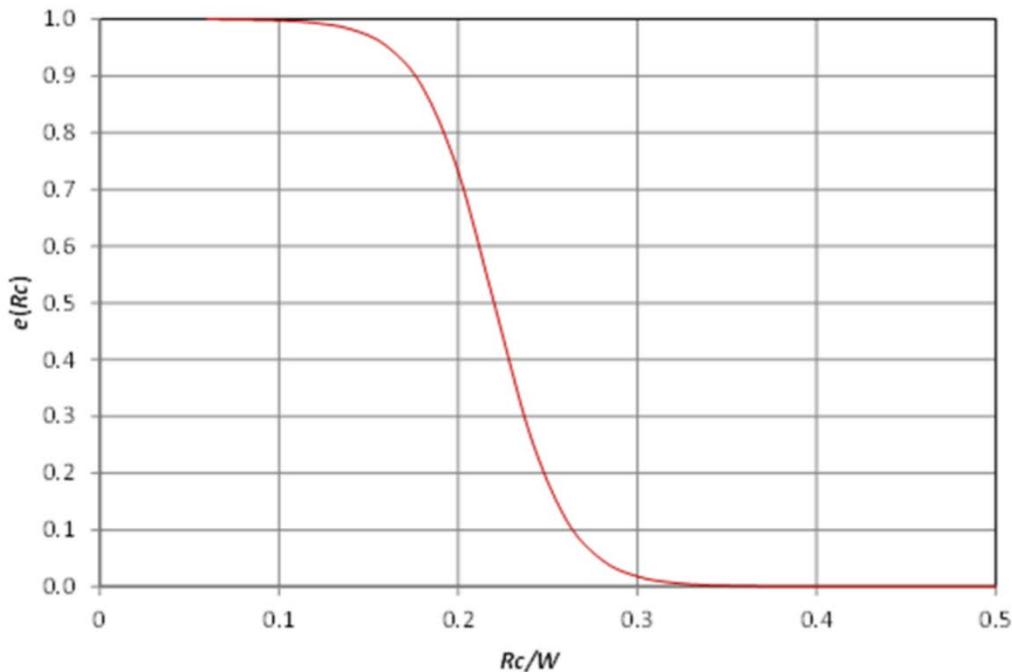


Рисунок 8 – Зависимость эффективности метода от радиуса зоны связи между кластерами RC

Можно заметить, что применение метода целесообразно, когда радиус зоны связи маршрутизаторов в mesh сети меньше размера зоны обслуживания. Это естественно, т.к. в противном случае, любое расположение маршрутизатора равнозначно, с точки зрения обеспечения связности.

В приведенном выше примере, при размере зоны обслуживания 500x500 м. и заданном распределении пользователей, при размере зоны связи маршрутизатора около 0,23 размера зоны обслуживания эффективность предложенного метода составляет около 50%.

Эффективность метода тем выше, чем меньше отношения радиуса зоны связи маршрутизатора к размеру зоны обслуживания. Таким образом его применение целесообразно при необходимости обслуживания относительно больших площадей или объемов.

В главе 4 рассмотрены существующие методы миграции сервисов, сетевых функций, предложен алгоритм автоматизации миграции сервисов, который отслеживает состояние очереди запросов, скорость их выполнения, имеет доступ к информации о нагрузке на процессор и память на узлах, а также о состоянии коммуникационной сети между кластерами для оперативной оценки

времени, затрачиваемого на операции миграции.

При разработке алгоритма, учитывающего состояние системы для принятия решения о миграции, необходимо в первую очередь рассмотреть, какие типы задач будут решать сервисы, определить необходимую скорость реакции системы для каждого типа. Для тестирования алгоритма будут использоваться два типа задач, которые необходимо решать в процессе эксплуатации:

- Тип 1 – оперативные задачи, требующие высокой скорости отклика системы, теряющие актуальность в течение 1 с, критические;
- Тип 2 – второстепенные задачи, требующие больше вычислительных ресурсов, теряют актуальность в течение 10 с, некритичные.

Метод автоматического размещения нод, используемый для сравнения с планировщиком, работает по простому алгоритму - размещаем здесь, если есть доступный ресурс, если нет - передаем запрос дальше или отбрасываем.

Проверка скорости работы системы с использованием автоматической миграции по сравнению с планировщиком. Для решения задач будет использоваться шаблон оператора, который позволяет отслеживать загрузку узлов, перенаправление запросов осуществляется путем размещения проксирующего контейнера, который отправляет запрос в облачный кластер. При увеличении нагрузки будет автоматически осуществляться горизонтальное масштабирование количества нод на узле, количество определяется максимальной производительностью при параллельном выполнении запросов.

Эксперимент показал, что при наличии систем автоматического отслеживания необходимости проведения процедур миграции сервисов общая способность системы справляться с повышенными нагрузками возрастает по сравнению с тем, если бы перенос и планирование размещения нод с сервисами осуществлялись вручную или полностью отсутствовали.

В главе 5 метод реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого и шестого поколений, позволяющий в режиме реального времени передавать жестовую речь.

Целью эксперимента является создание веб-приложения с микросервисной архитектурой, позволяющего управлять рукой робота и считывать показания “перчатки” в режиме реального времени для воспроизведения и считывания позиций руки соответствующей букве из алфавита языка жестов.

Рука должна позволять показывать, а перчатка считывать буквы на языке

жестов, как режиме передачи тактильных ощущений, так и в режиме аватара, повторяя движения при наступлении определенного события.

В целях проведения анализа уровня задержек, а также исследования методов их сокращения предлагается рассмотреть IoT систему взаимодействия робо-перчатки и ее виртуального аватара. В ходе эксперимента предлагается произвести сравнительный анализ трех схем взаимодействия (Рисунок 9):

1. Все составные части системы располагаются в локальной сети.
2. Робо-перчатка и приложение 3D визуализации располагается локально, а MQTT брокер на удаленной машине в сети Интернет. Взаимодействие производится по Wi-Fi.
3. Робо-перчатка находится в локальной сети, приложение и брокер подвергаются миграции, с использованием Docker контейнеров.

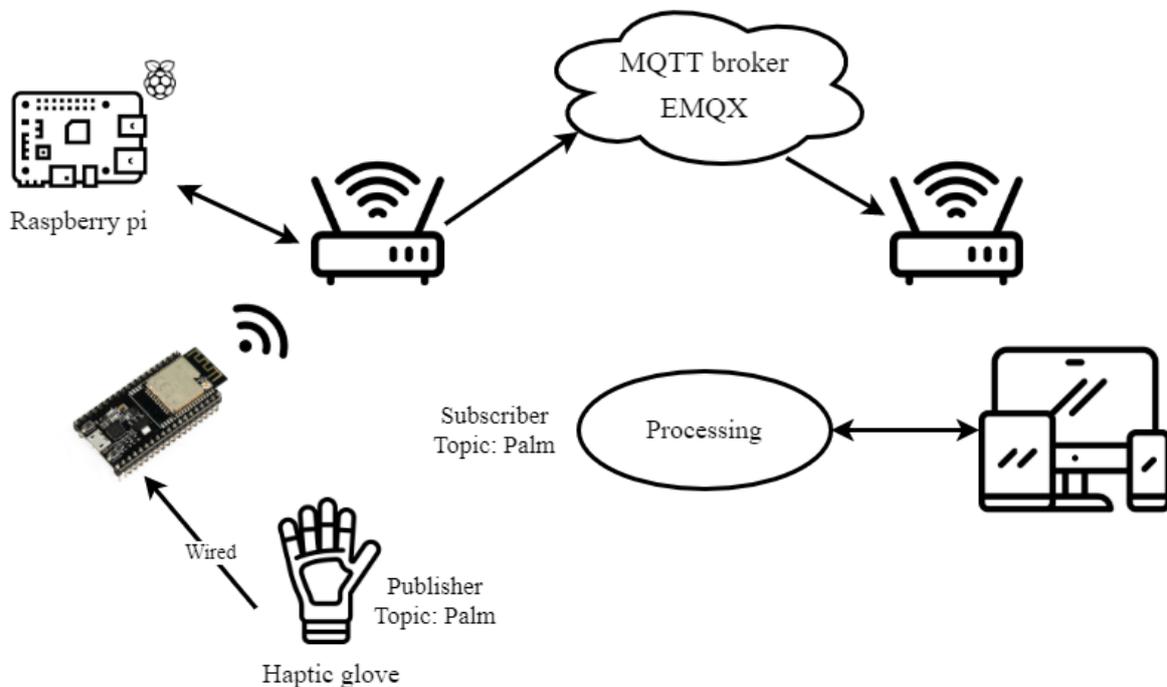


Рисунок 9 – Общая схема взаимодействия устройств

Для варианта 1 наблюдается негативное влияние возрастающей нагрузки на MQTT брокер по мере его наполнения (рисунок 10). В среднем “пороговое” значение количества пакетов достигает 300 000 шт. После перезагрузки сервера (сброса накопленного объема данных) качество работы восстанавливается. На основании варианта 2, учитывая задержки прохождения ICMP пакетов до описанного сервера в размере 50-70 мс, можно сделать вывод о стабилизации работы стенда, за счет разворачивания брокера на отдельной, более производительной ЭВМ (рисунок 11). В варианте 3 задержки прохождения ICMP

пакетов между конченным оборудованием стенда сократилась до 2-4 мс. Таким образом общая работа стенда укладывается в пределах 10-11 мс задержки, что не позволяет передать тактильные ощущения, но вполне достаточно для выполнения поставленных задач (рисунок 12). В сравнение с вариантом 1 стенда начал функционировать в стабильном состоянии. Дополнительно был произведен эксперимент по работе сервиса в течение 2 часов, качество работы стенда осталось неизменным.

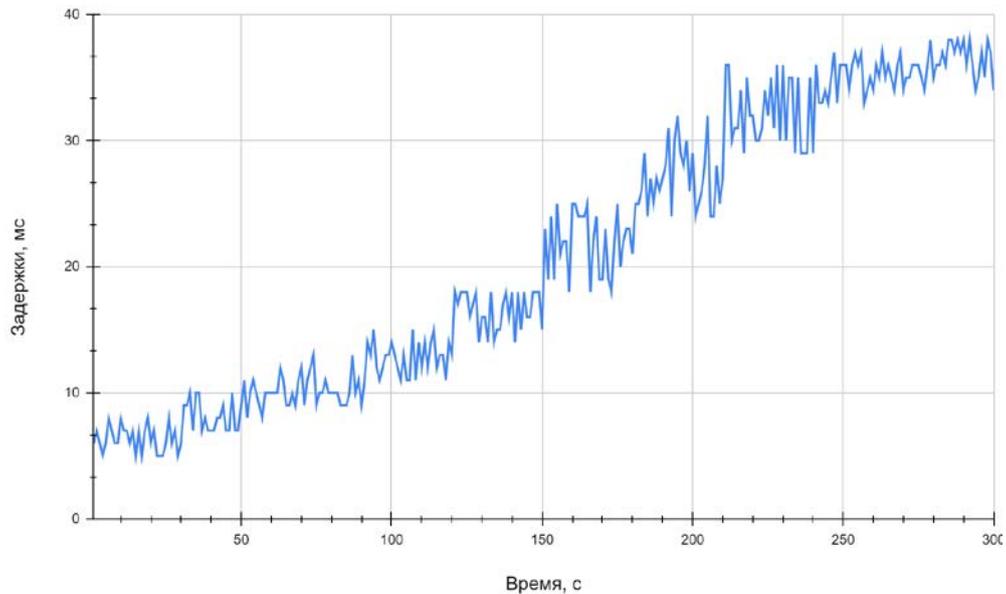


Рисунок 10 – График распределения задержек для варианта № 1

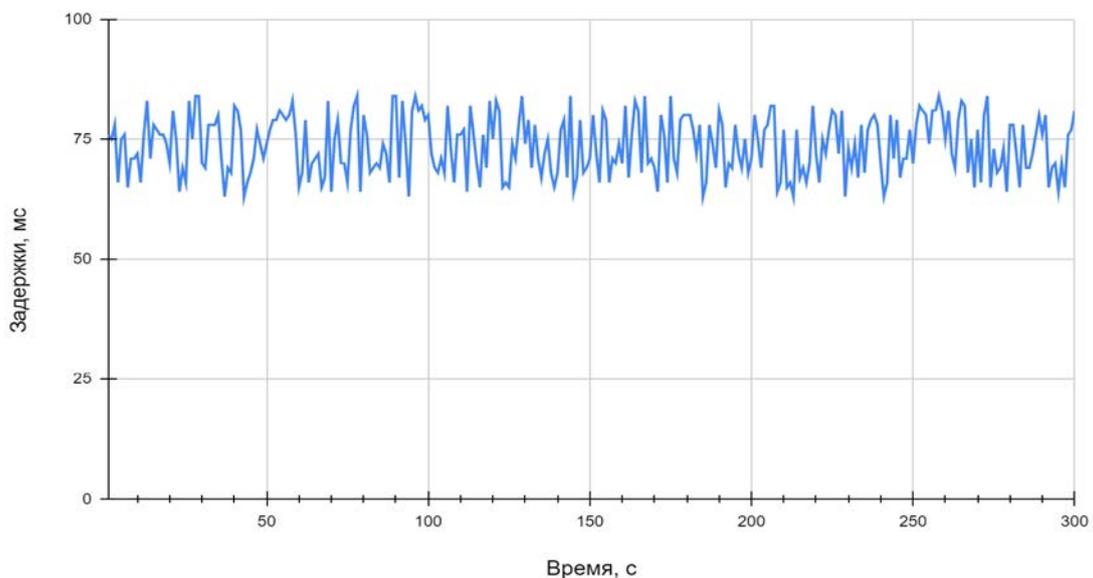


Рисунок 11 – График распределения задержек для варианта № 2

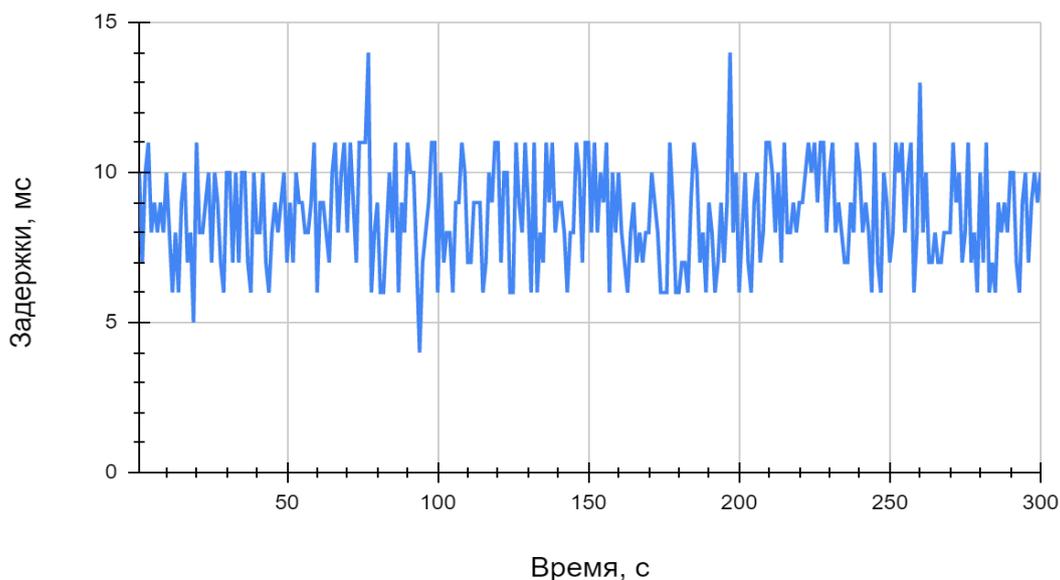


Рисунок 12 – График распределения задержек для варианта № 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Предложенный метод оптимизации числа контроллеров в мультиконтроллерных сетях SDN демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционным методом. Он снижает среднее число контроллеров на 46% за счет динамического управления, что уменьшает энергопотребление и затраты на развертывание, а также повышает надежность сети.

2. Предложенный метод на 53% повышает эффективность использования контроллеров, за счет динамического распределения нагрузки между ними в мультиконтроллерных сетях SDN, тем самым значительно сокращая расходы на развертывание сети.

3. Предложенный алгоритм кластеризации, являющийся модификацией алгоритма FOREL, обеспечивает выбор позиций маршрутизаторов для обслуживания пользователей и организации связной mesh сети и связи этой сети с базовой станцией подвижной связи.

4. Модификация алгоритма кластеризации, обеспечивающая перераспределение элементов кластеров, позволяет повысить качество кластеризации путем выравнивания количества элементов выделяемых кластеров.

5. Метод маршрутизации трафика в mesh сети обеспечивает выбор маршрутов на основе минимизации интегрального показателя качества маршрута, учитывающего достижимую скорость передачи данных, величину нагрузки и вероятность потерь.

6. Предложенный метод распределения маршрутизаторов в рое БПЛА или на единичных или привязных БПЛА эффективен в случае, когда размер зоны связи маршрутизатора меньше размера зоны обслуживания.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кузнецов К.А. Методы размещения маршрутизаторов сети на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и обеспечения маршрутизации с помощью роя БПЛА / К.А. Кузнецов, А.Е. Кучерявый, А.С.А. Мутханна, А.И. Парамонов // Труды учебных заведений связи 2024. Т. 10. № 4. С. 24-34.

2. Кузнецов К.А. Интеллектуальное ядро сети для интегрированной сети 6G на основе технологии SDN для поддержки приложений телеприсутствия // Электросвязь. 2024. № 8. С. 26-31.

Работы в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science:

3. Kuznetsov K., Muthanna A., Ateya A. A., Koucheryavy A. Revolutionizing H2M interaction: telepresence system enabling sign language expansion for individuals with disabilities // Lecture Notes in Computer Science (LNCS). Cham: Springer Nature Switzerland. 2023. Vol. 14123. pp. 21-33.

4. Kuznetsov K., Kuzmina E., Lapteva T., Volkov A., Muthanna A., Aziz A. Service migration algorithm for distributed edge computing in 5G/6G networks // International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. Lecture Notes in Computer Science (LNCS). Cham: Springer Nature Switzerland. Vol 14542. pp. 320-337.

Работы, опубликованные в других изданиях и конференциях:

5. Кузнецов К.А. Мета вселенные и методы их реализации в сетях связи 2030 / К.А. Кузнецов, А.Е. Кучерявый, А.С.А. Мутханна // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова,

посвященная Дню радио: сборник докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ».2024. С. 200-201

6. Кузнецов К.А. Анализ технологии для совместной работы приложений и сервисов метавселенных / М.Д. Леонова, А.С.А. Мутханна, К.А. Кузнецов // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сборник докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ».2024. С. 216-219

7. Кузнецов К.А. Тактильный интернет и его приложения / К.А. Кузнецов, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации.2019. Т. 7. №2. С. 12-20.

8. Кузнецов К.А. Тактильный интернет в сфере промышленности / К.А. Кузнецов, А.С.А. Мутханна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2020. Т. 1. С. 667-672.

9. Кузнецов К.А. Комплекс средств натурального моделирования услуг иммерсивных технологий для людей с ограниченными возможностями / К.А. Кузнецов, М.Д. Леонова, А.С.А. Мутханна // Информационные технологии и телекоммуникации.2022. Т. 10. №4. С. 13-26.

10. Кузнецов К.А. Методы реализации иммерсивных технологий в сетях связи пятого поколения / К.А. Кузнецов, А.С.А. Мутханна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XI Юбилейная международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 1. С. 627-631.

11. Kuznetsov K. Tactile Internet applications for distance learning foreign languages: pros and cons / K. Kuznetsov, E.P. Zheltova // Вестник гуманитарного факультета СПбГУТ. 2020. №12 С. 361-366.