

На правах рукописи

Алзагир Аббас Али Хасан

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА
ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата 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 руководитель: 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

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

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов» ,
г. Москва

Защита состоится 14 июня 2023 года в 16.00 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 14 апреля 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Развитие сетей связи в настоящее время происходит в направлении создания гетерогенных сетей. Начиная с сетей связи четвертого поколения, стало ясно, что только при использовании всевозможных ресурсов разнообразных сетевых технологий возможно оказать требуемые услуги пользователям сети с требуемыми характеристиками качества обслуживания. В сетях связи пятого поколения гетерогенность сети стала уже одной из основных характеристик, а при последующем внедрении сетей связи шестого поколения уже сегодня появилась концепция интегрированных сетей связи SAGSIN (Space – Air – Ground – Sea Integrated Networks). Появление сетей связи Космос – Воздух – Земля – Море является логическим продолжением развития сетей связи всех последних поколений. При этом завершается развитие сетей связи на основе теории конвергенции, происходившее с 1997 года, и появляются предпосылки к созданию Единой сети связи, объединяющей ресурсы всех сетей, функционирующих во всевозможных средах.

В диссертационной работе исследуются вопросы совместного использования ресурсов наземной и воздушной сети с использованием таких новых технологий телекоммуникаций как программно-конфигурируемые сети SDN (Software-Defined Networks), граничные вычисления MEC (Mobile Edge Computing) и беспилотные летательные аппараты UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Использование такой тройки должно помочь обеспечить обслуживание гетерогенного трафика сетей связи пятого поколения с использованием при необходимости ресурсов всех указанных технологий. Попутно в диссертации потребовалось решить и еще одну задачу, связанную с отсутствием в существующих моделях трафика характеристик агрегированного трафика Интернета Вещей IoT (Internet of Things), Тактильного Интернета TI (Tactile Internet) и Дополненной реальности AR (Augmented Reality). С учетом изложенного тема диссертационной работы представляется актуальной.

Степень разработанности темы. В области сетей связи пятого поколения, БПЛА, программно-конфигурируемых сетей и граничных вычислений существует ряд работ отечественных и зарубежных ученых В.М. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевского, Р.В. Киричка, А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, В.К. Сарьяна, Р.Л. Смелянского, С.Н. Степанова, В.О. Тихвинского, А.В. Абилова, А.С. Бородина, Ю.В. Гайдамаки, Е.А. Кучерявого, М.А. Маколкиной, Д.А. Молчанова, А.С.А. Мутханны, А.А.А. Ateya, M. Dohler, M. Maier, и д.

Работы отмеченных выше авторов внесли весомый вклад в исследования в области сетей связи пятого поколения, гетерогенного трафика, программно-конфигурируемых сетей, граничных вычислений и сетей БПЛА. Однако до настоящего времени практически не уделялось внимания совместному использованию указанных выше технологий для решения проблем обслуживания гетерогенного трафика сетей связи пятого поколения. Сложность этой проблемы определяется существенной

новизной архитектурных и системных решений при построении интегрированных сетей связи, в которых для обеспечения качества обслуживания используются различные новые технологии, функционирующие к тому же в различных средах пространства. Все это в целом и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. При этом решается следующая научная задача в области исследований по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций: исследование и разработка решений по созданию сетей связи на основе совместного использования технологий БПЛА, программно-конфигурируемых сетей и граничных вычислений.

Объект и предмет диссертации. Объектом исследования являются сети связи пятого поколения, а предметом – совместное использование технологий БПЛА, программно-конфигурируемых сетей и граничных вычислений.

Цель и задачи диссертации. Цель диссертационной работы состоит в исследовании проблем создания сетей на основе совместного использования технологий БПЛА, программно-конфигурируемых сетей и граничных вычислений для обеспечения требований к качеству обслуживания в сетях связи пятого поколения.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

- анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений,
- анализ использования технологий БПЛА для развития сетей связи,
- анализ использования технологий программно-конфигурируемых сетей и граничных вычислений для развития сетей связи,
- разработка модели трафика для агрегированного трафика Интернета Вещей, Тактильного интернета и дополненной реальности и исследование характеристик такой модели,
- разработка метода построения сети с использованием БПЛА, в котором элементы программно-конфигурируемых сетей полностью реализованы на БПЛА, уровень передачи данных реализован на группах БПЛА, объединенных в кластеры и выполняющих функции коммутаторов сети SDN, уровень управления реализован на отдельных привязных БПЛА, выполняющих функции контроллеров сети SDN.
- разработка алгоритма кластеризации для группы БПЛА на основе метода k-средних, позволяющего найти рациональные координаты для размещения контроллеров.
- разработка метода выгрузки трафика с наземной сети на БПЛА при условии того, что выгрузка может быть осуществлена как непосредственно на БПЛА, так и на БПЛА, оборудованный ретранслятором для передачи информации на граничный и/или облачный сервер наземной сети.
- разработка алгоритма выгрузки трафика для предложенного метода для определения значения задержки для выбора размера группы БПЛА, при котором

задержка для выгрузки трафика с наземной сети на группу БПЛА будет меньше, чем в случае использования БПЛА как ретранслятора для граничного/облачного сервера.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. В отличие от известных моделей трафика была предложена модель, в которой к трафику Интернета Вещей и трафику Тактильного Интернета добавляется трафик дополненной реальности. При этом было установлено, что вероятность потерь пакетов для трафика AR больше, чем для трафика IoT и меньше, чем для трафика TI, а входящий агрегированный поток трафика IoT, TI и AR является самоподобным с параметром Херста $H = 0,7$.

2. Разработан метод построения сети с использованием БПЛА, в котором элементы программно-конфигурируемых сетей полностью реализованы на БПЛА, отличающийся от известных тем, что уровень передачи данных реализован на группах БПЛА, объединенных в кластеры и выполняющих функции коммутаторов сети SDN, а уровень управления реализован на отдельных привязных БПЛА, выполняющих функции контроллеров сети SDN. При этом каждый из контроллеров взаимодействует с головным узлом своего кластера БПЛА, предусмотрено также взаимодействие контроллеров между собой.

3. Разработан алгоритм кластеризации для группы БПЛА на основе метода k-средних, позволивший найти рациональные координаты для размещения контроллеров, отличающиеся от исходных на величину до 100м в квадрате 1км на 1км.

4. Разработан метод выгрузки трафика с наземной сети на БПЛА, отличающийся от известных тем, что выгрузка может быть осуществлена как непосредственно на БПЛА, так и на БПЛА, оборудованный ретранслятором для передачи информации на граничный и/или облачный сервер наземной сети.

5. Разработан алгоритм выгрузки трафика для предложенного метода, основанный на алгоритме динамического программирования, использующего расстояние Хэмминга в качестве критерия для завершения своей работы и определены значения задержки для выбора размера группы БПЛА, при котором задержка для выгрузки трафика с наземной сети на группу БПЛА будет меньше, чем в случае использования БПЛА как ретранслятора для граничного/облачного сервера.

Теоретическая и практическая значимость диссертации. *Теоретическая значимость* диссертационной работы состоит, прежде всего, в разработке метода построения кластерной сети с использованием БПЛА и технологий программно-конфигурируемых сетей, когда элементы программно-конфигурируемых сетей полностью реализованы на БПЛА: уровень передачи данных реализован на группах БПЛА, объединенных в кластеры и выполняющих функции коммутаторов сети SDN, а уровень управления реализован на отдельных привязных БПЛА, выполняющих функции контроллеров сети SDN. Кроме того, весьма важным представляется разработанный метод выгрузки трафика с наземной сети на БПЛА, при использовании

которого выгрузка может быть осуществлена как непосредственно на БПЛА, так и на БПЛА, оборудованный ретранслятором для передачи информации на граничный и/или облачный сервер наземной сети. Самостоятельную теоретическую значимость имеет определение самоподобного характера потока агрегированного трафика IoT, TI и AR и значения параметра Херста для него.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования результатов работы для планирования сетей связи, а также в процессе обучения студентов и аспирантов по профильным специальностям.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Интернет Вещей и самоорганизующиеся сети», «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций» и «Сети связи для цифровой экономики».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана модель трафика, в которой к трафику Интернета Вещей и трафику Тактильного Интернета добавляется трафик дополненной реальности. При этом установлено, что вероятность потерь пакетов для трафика AR больше, чем для трафика IoT и меньше, чем для трафика TI, а входящий агрегированный поток трафика IoT, TI и AR является самоподобным с параметром Херста $H = 0,7$.

2. Разработан метод построения кластерной сети с использованием БПЛА и технологий программно-конфигурируемых сетей. При этом элементы программно-конфигурируемых сетей полностью реализованы на БПЛА: уровень передачи данных реализован на группах БПЛА, объединенных в кластеры и выполняющих функции коммутаторов сети SDN, а уровень управления реализован на отдельных привязных БПЛА, выполняющих функции контроллеров сети SDN. Разработанный алгоритм кластеризации на основе метода k-средних позволяет найти рациональные координаты для размещения контроллеров, отличающиеся от исходных на величину до 100м в квадрате 1 км на 1 км.

3. Разработан метод выгрузки трафика с наземной сети на БПЛА, при использовании которого выгрузка может быть осуществлена как непосредственно на БПЛА, так и на БПЛА, оборудованный ретранслятором для передачи информации на граничный и/или облачный сервер наземной сети. С использованием разработанного алгоритма выгрузки трафика на основе динамического программирования, использующего расстояние Хэмминга в качестве критерия для завершения своей работы, определены значения задержки для выбора размера группы БПЛА, при

котором задержка для выгрузки трафика с наземной сети на группу БПЛА будет меньше, чем в случае использования БПЛА как ретранслятора для граничного/облачного сервера.

Степень достоверности и апробация результатов. *Достоверность* основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications, DCCN (2021), International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN (2021), The International Congress On Ultra Modern Telecommunications And Control Systems, ICUMT (2020), 75-я и 77-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню Радио (Санкт-Петербург, 2020, 2022), Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (Санкт-Петербург, 2020)

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 5 статей в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS (Q2), 4 работы в журналах и сборниках докладов конференций, включенных в РИНЦ.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций:

п. 4 – Разработка эффективных путей развития и совершенствования структуры, архитектуры сетей и систем телекоммуникаций, включая входящие в них элементы.

п. 7 – Исследование проблем построения, планирования и проектирования сетей пятого и последующих поколений как основы создания эффективной цифровой экономики и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей

п. 10 – Исследование проблем построения, планирования и проектирования программно-конфигурируемых сетей и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей

п. 11 – Исследование проблем построения и планирования сетей для беспилотного транспорта, в том числе для беспилотных летательных аппаратов и беспилотных автомобилей, и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей.

п. 12 – Исследование методов распределения коммуникационных ресурсов для граничных и туманных вычислений, а также при выгрузке трафика для обеспечения эффективного функционирования современных сетей телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из четырех глав, заключения, списка литературы, одного приложения и содержит 147 страниц, иллюстрированных 35 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 172 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна результатов диссертации, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях и семинарах, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ возможности интеграции беспилотных летательных аппаратов БПЛА и наземных сетей связи пятого и последующих поколений. Естественно, взаимодействие воздушной сети с наземной сетью в сетях связи пятого и последующих поколений делает эти сети более гибкими и предоставляет пользователям услуги с лучшим качеством за счет интеграции ресурсов наземной и воздушной сети.

Во второй главе диссертации проведен анализ технологий программно-конфигурируемых сетей и возможности их интеграции с сетями беспилотных летательных аппаратов БПЛА. Программно-конфигурируемые сети — это многообещающая новая архитектура для многих сетевых сред, таких как сети связи общего пользования, центры обработки данных, корпоративные сети, кампусные сети, облачные сети и глобальные сети. Основными преимуществами SDN являются ее программируемость и гибкость. Во второй главе были получены следующие основные результаты:

1. Проанализированы решения по SDN с одним контроллером в ядре сети и мульти контроллерные SDN. На основе этого анализа были рассмотрены решения по интегральному использованию SDN и БПЛА.

2. Использование SDN совместно с БПЛА дает большие преимущества при развертывании сети БПЛА, которые могут как повысить эффективность сетевой структуры БПЛА в целом, так и снизить энергопотребление БПЛА, а также ускорить развертывание сети и уменьшить ее стоимость.

В третьей главе предложена комплексная аналитическая модель для потоков трафика IT, AR и IoT для оценки QoS по параметрам вероятности потерь пакетов и

задержки доставки. Предлагается модель для анализа потоков трафика в сетях 5G и последующих поколений: тактильного интернета (ТИ), дополненной реальности (AR) и интернета вещей. При этом ключевым требованием при реализации AR и ТИ является обеспечение ультрамалой задержки. Оценивается влияние такого разнородного трафика на основные показатели качества обслуживания, отражающие вероятность потери пакетов и задержку доставки по времени. В качестве модели сети связи используется система массового обслуживания с комбинированной дисциплиной обслуживания, как показано на Рисунке 1.

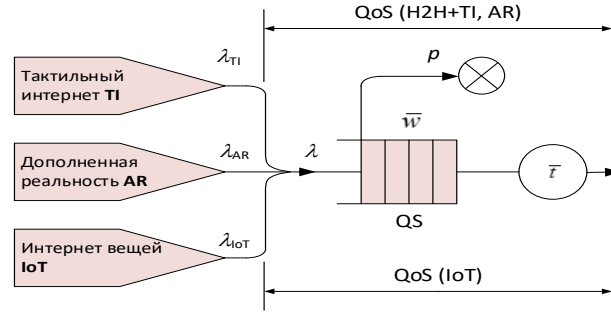


Рисунок 1 – Системная модель

В данной работе качество обслуживания системы будем определять вероятностью отказа в обслуживании (потери пакетов) p и задержкой пакетов, где задержка возникает из-за времени ожидания \bar{w} в очереди и времени обслуживания пакетов со средней длительностью обслуживания \bar{t} (рис. 1). На входе в систему характеристики смешанного потока определяются свойствами всех потоков. Поэтому, в целом поток отличается от свойств потоков как трафика IoT, так и традиционного трафика.

Аналитическую модель для оценки вероятности потерь и задержки пакетов за счет времени ожидания в очереди и длительности обслуживания представим моделью $G/G/1/k$.

Для оценки вероятности потерь пакетов при известных параметрах распределения, описывающих трафик и процесс обслуживания пакетов, может быть использовано выражение

$$p = \frac{1 - \rho}{1 - \rho \frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b + 1} \rho \frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b \quad (1)$$

где ρ – загрузка системы; n_b – размер буфера; C_a^2 и C_s^2 – квадратичные коэффициенты вариации распределений входящего потока и длительности обслуживания соответственно. Уравнение для оценки времени доставки пакетов тогда имеет следующий вид:

$$T = \frac{\rho \bar{t}}{2(1 - \rho)} \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left(\frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t} \quad (2)$$

где σ_a^2 и σ_s^2 – значения дисперсий интервала времени между поступлением пакетов и длительности обслуживания соответственно; \bar{a} – среднее значение интервала между пакетами; \bar{t} – средняя длительность обслуживания.

Потоки трафика TI и AR обладают свойствами самоподобных потоков. Трафик же IoT можно отнести к детерминированным потокам.

Среда моделирования была реализована на Anylogic. При этом, во-первых, необходимо было определить типы распределений каждого трафика. Как указано выше, первые два типа трафика (TI и AR) обладают свойствами самоподобного потока и требуют генерации последовательности независимых событий и случайного изменения временных интервалов между ними.

Моделирование трафика AR было выполнено с помощью очков дополненной реальности, подключенных к интернету через Wi-Fi, и приложения Wireshark для анализа данных о трафике и определения характера распределения (рис.2).

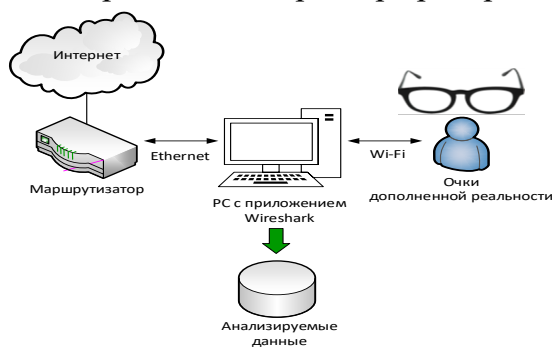


Рисунок 2 – Моделирование трафика дополненной реальности

На рис. 3 и 4 приведена оценка вероятности потерь в зависимости от интенсивности нагрузки ρ при разных размерах буфера $n = 2$ и 10. Штриховые кривые – результаты, полученные по формуле (1), а сплошные – оценки моделирования на Anylogic. Для детерминированного потока вероятность потери пакетов получена для трафика IoT (черные пунктирные и сплошные кривые) для размеров буфера 2 и 10.

Кроме того, для самоподобного потока приведены вероятности потери пакетов в зависимости от интенсивности нагрузки для тактильного трафика (красная кривая) и трафика AR (синяя), полученные при моделировании на Anylogic с размерами буфера 2 и 10, красная пунктирная линия соответствует вычислениям по формуле (1). Для размера буфера $n = 10$ результаты вычислений дают несколько заниженное значение коэффициента потерь при использовании формулы (1). Заметим также, что вероятность потерь с точки зрения AR несколько ниже вероятности потерь для TI и выше, чем для IoT-трафика.

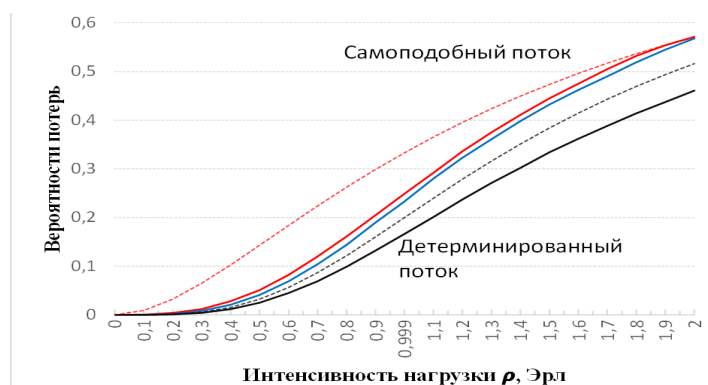
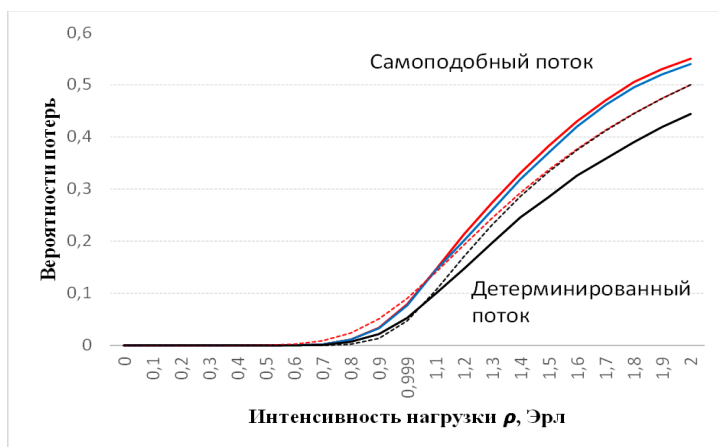
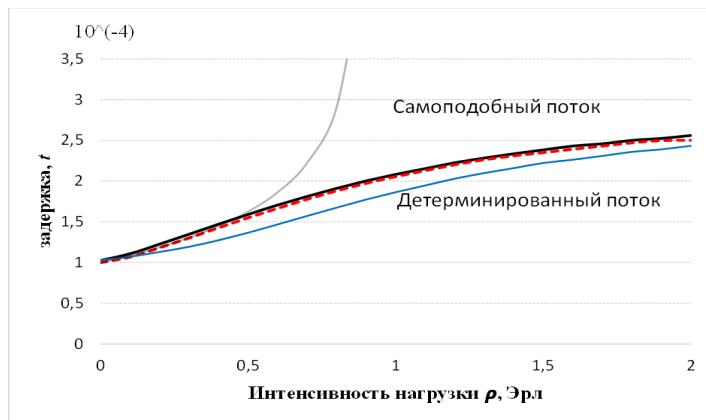
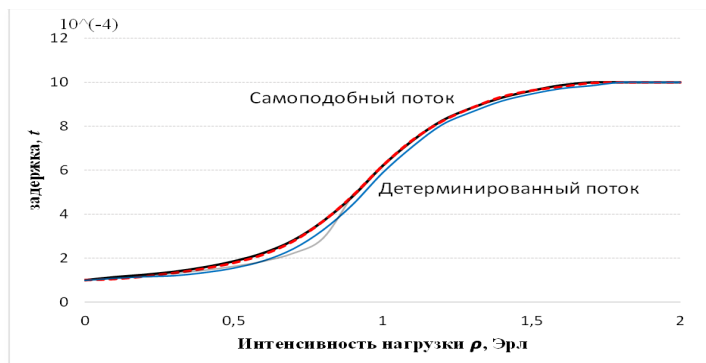


Рисунок 3 – Вероятность потерь, $n = 2$

Рисунок 4 – Вероятность потерь, $n = 10$

На рис. 5 и 6 представлены зависимости задержки доставки пакетов от интенсивности нагрузки ρ для самоподобного потока (черная и красная пунктирные кривые) и детерминированного (синяя кривая), а также для агрегированной модели (серая) по формуле (2) с буфером размерами $n = 2$ и 10 .

Для детерминированного потока время задержки доставки при интенсивности нагрузки меньше, чем время задержки для самоподобного потока, TI и AR в обоих случаях размера буфера. Кроме того, время доставки для трафика AR (штриховая красная кривая) при размере буфера $n = 2$ немного меньше, чем время задержки TI (черная кривая). Тогда как при размере буфера $n = 10$ задержка AR почти равна задержке TI.

Рисунок 5 – Задержка доставки пакетов, $n = 2$ Рисунок 6 – Задержка доставки пакетов, $n = 10$

Предложенная модель дает возможность оценить не только качество обслуживания объединенного потока трафика услуг интернета вещей, тактильного интернета и дополненной реальности, но также задержку доставки и вероятность потери пакета. Применение модели позволило изучить зависимость качества обслуживания от свойств объединенных потоков трафика и зависимость свойств обслуженного потока от интенсивности нагрузки. Увеличение интенсивности нагрузки приводит к доминированию влияния свойств системы обслуживания, а ее снижение – к доминированию свойств входящего потока.

В четвертой главе разработан метод построения сети с использованием БПЛА, в котором элементы программно-конфигурируемых сетей полностью реализованы на БПЛА, отличающийся от известных тем, что уровень передачи данных реализован на группах БПЛА, объединенных в кластеры и выполняющих функции коммутаторов сети SDN, а уровень управления реализован на отдельных привязных БПЛА, выполняющих функции контроллеров сети SDN. При этом каждый из контроллеров взаимодействует с головным узлом своего кластера БПЛА, предусмотрено также взаимодействие контроллеров между собой.

В главе также разработан метод выгрузки трафика с наземной сети на БПЛА, отличающийся от известных тем, что выгрузка может быть осуществлена как непосредственно на БПЛА, так и на БПЛА, оборудованный ретранслятором для передачи информации на граничный и/или облачный сервер наземной сети.

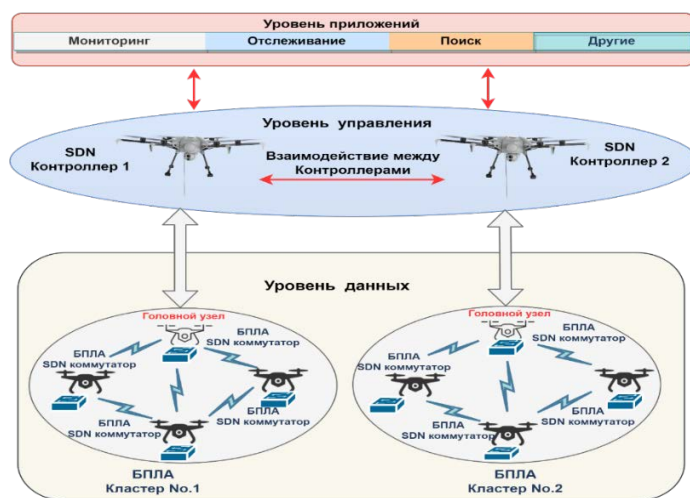


Рисунок 7 – Сетевая архитектура БПЛА с контроллерами SDN в летающем сегменте

На рисунке 7 показана архитектура сети БПЛА с интеграцией технологий SDN, в качестве контроллера SDN используются привязные БПЛА, принадлежащие воздушному сегменту сети и имеющие возможность взаимодействовать друг с другом. Также в этой архитектуре БПЛА разделены на кластеры, в каждом из которых один БПЛА играет роль головного узла, через который члены этого кластера взаимодействуют с БПЛА из другого кластера. Другими словами, взаимодействие БПЛА из разных кластеров осуществляется посредством обмена информацией между головными узлами кластеров, которые, в свою очередь, могут взаимодействовать друг с другом напрямую через наземные БС или через привязные БПЛА.

В данной работе предложен способ организации сети БПЛА для сбора данных с сенсорных полей, когда стационарные привязные БПЛА выполняют функции контроллеров SDN, как это было показано на рис.7.

Кроме того, эта сетевая структура БПЛА распределена по нескольким кластерам, что, в свою очередь, требует выбора головного узла для взаимодействия с привязными БПЛА. Предположим, что такому рою БПЛА необходимо собрать данные с сенсорных узлов из определенной области. При этом как группы БПЛА, так и сенсорные поля по территории будут распределены с разной плотностью.

Управление потоками передачи данных и, следовательно, управление передачей пакетов данных в сети будет осуществляться стационарными привязными БПЛА. Таким образом, в сети БПЛА с интеграцией технологии SDN привязной БПЛА будет выступать в роли контроллера SDN. Как отмечалось ранее, в этой сети БПЛА в рамках технологии программно-конфигурируемых сетей будут выполнять функции коммутаторов SDN. Все БПЛА одного кластера предлагается подключать к привязному БПЛА, расстояние между которым и головным узлом кластера будет минимальным. Расстояние между привязным БПЛА и головным узлом было выбрано в качестве критерия для выбора привязного БПЛА, поскольку вся информация управления потоком будет проходить через головной узел.

Предполагается, что внутри одного кластера БПЛА могут свободно взаимодействовать друг с другом. Для передачи данных сенсорных узлов в другую сеть или конечному пользователю собранные данные с отдельных БПЛА передаются в головной узел кластера, а от головного узла – на привязной БПЛА. Следует отметить, что взаимодействие БПЛА из разных кластеров также будет осуществляться через головные узлы кластеров и привязной БПЛА. Также предполагается, что для передачи информации привязные БПЛА будут обладать возможностью обмена данными друг с другом и с наземной инфраструктурой. При организации сети с внедрением привязных БПЛА в качестве контроллеров SDN необходимо учитывать следующие задачи:

- 1) формирование кластеров БПЛА;
- 2) выбор головных узлов в каждом кластере;
- 3) определение пути движения групп БПЛА для оптимального сбора данных с нескольких сенсорных полей.

Для решения всех этих задач, используем алгоритм **k-средних** для формирования кластеров БПЛА, **алгоритм FOREL** для определения пути движения групп БПЛА.

Выбор головного узла в каждом кластере БПЛА предлагается производить по значению суммы параметров БПЛА: в качестве головного узла будет выбран тот БПЛА, суммарное значение параметров которого в пределах одного кластера будет наибольшим. Суммарное значение параметров определяется следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i \quad (3)$$

где S – общий параметр; W_i – вес i -го параметра; R_i – значение i -го параметра; n – число параметров.

Будем использовать следующие четыре параметра: CPU, память, батарея, емкость сети. Значения весовых коэффициентов для каждого параметра БПЛА представлены в таблице 1, все они задаются в процентах.

Таблица 1 – Значение весов для каждого параметра БПЛА

Ресурс устройства, R	Весовой коэффициент, W
Батарея	0.34
CPU	0.22
Память	0.22
Емкость сети	0.22

В таблицах 2-4 и на рисунках 8 и 9 приведены результаты моделирования.

Таблица 2 – Значения параметров БПЛА

№ БПЛА	1 БПЛА группа				2 БПЛА группа			
Батарея, %	44	38	56	57	62	60	58	41
CPU, %	26	66	51	71	62	33	64	30
Память, %	31	73	72	30	74	56	70	35
Емкость сети, %	46	42	68	73	75	38	37	46
Итого, %	37.62	52.74	61.06	57.66	67.5	48.34	57.34	38.36

Таблица 3 – Координаты пути движения

Поля сенсоров	1	2	3	4	5	6
Изначальные координаты пути	250.4300	249.4372	500.3774	499.4920	749.5322	749.2641
	250.7785	750.4209	749.4930	249.9028	750.8624	250.2313
Координаты найденного пути	252.5074	246.2347	512.3393	495.4359	748.5660	757.2423
	254.6018	739.6170	767.4720	251.7571	753.5483	242.6276

Таблица 4. Параметры кластеров БПЛА

Группа БПЛА	1	2
Изначальные координаты центров (x, y), м	299.6884	700.5088
	499.5166	500.2622
Найденные координаты центров кластеров (x, y), м	315.18	695.03
	495.27	494.89
БПЛА с наибольшими параметрами	3	1
Суммарное значение наибольшего параметра	61.0600	67.5000
Ближайший номер контроллера SDN	1	16
Координаты ближайшего контроллера SDN (x, y), м	319.55	774.91
	502.19	517.23

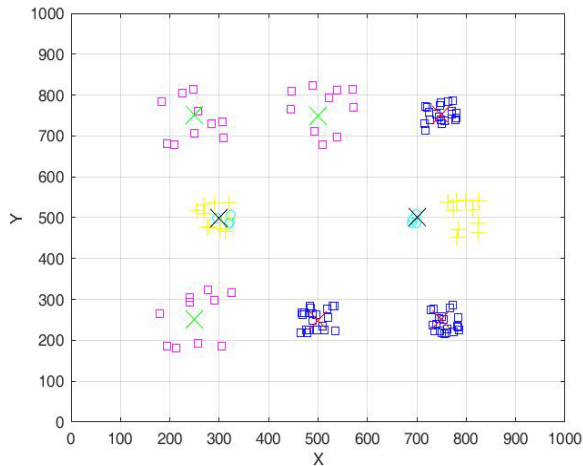


Рисунок 8 – Изначальная схема сети БПЛА

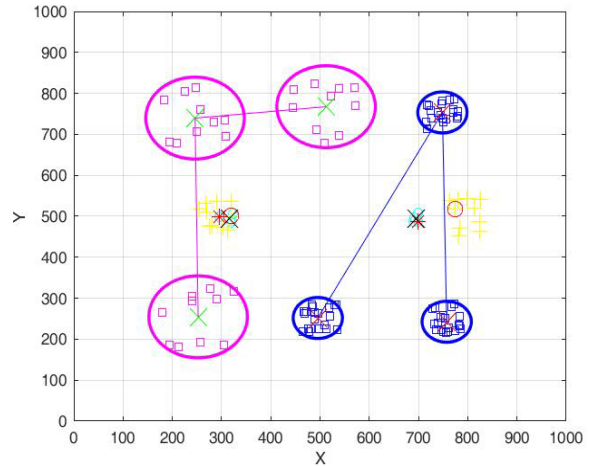


Рисунок 9 – Схема сети БПЛА после выполнения предлагаемого алгоритма

Контроллеры SDN располагались произвольно по двум группам относительно координат (300,500) и (800,500) по 10 устройств в каждой группе.

Элементы сети на рисунках 8 и 9 отображены следующими обозначениями:

- розовый овал – зона сбора 1 группы БПЛА;
- голубой овал – зона сбора 2 группы БПЛА;
- линиями отображен маршрут передвижения группы БПЛА;
- зеленые крестики – центры зон сбора данных с сенсорных полей 1–3;
- красные крестики – центры зон сбора данных с сенсорных полей 4–6;
- черные крестики – центры групп БПЛА;
- розовые квадратики – сенсорные устройства сенсорных полей 1–3;
- голубые квадратики – сенсорные устройства сенсорных полей 4–6;
- голубые кружочки – БПЛА;
- желтые плюсы – SDN контроллеры;
- красный кружок – ближайший SDN контроллер к определенной группе БПЛА;
- красная звездочка – БПЛА с наилучшими параметрами.

В главе также исследуется проблема летающих мобильных граничных вычислений на основе UAV-MEC для обеспечения поддержки наземных сетей, например, IoT, которые генерируют данные по результатам измерений в окружающей среде. Предлагаемая системная модель включает в себя набор наземных сенсоров, которые распределены для примера на умной ферме, и генерируют данные, необходимые для обработки. Кроме того, системная модель включает два БПЛА, один из которых оборудован сервером граничных вычислений, а другой - ретранслятором. Удаленная базовая станция также имеет граничный сервер, как это показано на рисунке 10.



Рисунок 10 – Системная модель

Для выполнения задач данные будут выгружены и обработаны либо на БПЛА-МЕС, когда решение о разгрузке двоичных вычислений α_i равно «1», либо удаленно на центральный граничный облачный сервер путем передачи задач через БПЛА-ретранслятор, когда решение о разгрузке бинарных вычислений α_i равно «0». Общую длительность с учетом использования летающего сегмента можно определить следующим образом:

$$T_i^{\text{total}} = \alpha_i T_{\text{UAV-MEC}}^{\text{total}} + (1 - \alpha_i) T_{\text{server}}^{\text{total}} \quad (4).$$

Проблема выгрузки вычислений формулируется в виде следующей задачи оптимизации с ограничениями:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N T_i^{\text{total}}, \quad & (5) \\ T_i^{\text{total}} \leq T_i^{\text{constraint}} \quad & C1 \\ \alpha_i \in \{0,1\} \quad & C2 \end{aligned}$$

Целью данного исследования является минимизация взвешенной суммы задержек путем оптимального распределения выгрузки задач. Ограничения C1 представляют собой верхние границы по затратам времени. Ограничение C2 является гарантией того, что принятые решения о выгрузке являются бинарными значениями.

Алгоритм выгрузки для летающих вычислений основан на алгоритме динамического программирования, использующего расстояние Хэмминга в качестве критерия для завершения своей работы (DPH). Динамическое программирование лежит в основе предлагаемого алгоритма, основанного на использовании таблицы $N \times N$ (где N – число задач, которые необходимо обработать). Таблица используется для хранения битового потока, чтобы гарантировать, какая задача будет обрабатываться на ближайшем UAV-МЕС, а какие задачи будут выполняться удаленно на граничном сервере. В таблице генерируемые случайные битовые потоки заполняются единицами (1) в горизонтальной ячейке. Нули (0s) заполняются в вертикальной ячейке. Первая ячейка всегда пуста. Чтобы проиллюстрировать процесс заполнения таблицы сгенерированным случайным битовым потоком, предположим, что $N = 8$, первый случайный битовый поток α_i равен 00110100 (красные биты), а второй случайный битовый поток равен 10101101 (черные биты). Следуя этому правилу, результирующий поток показан в таблице 5.

Таблица 5 –Случайный битовый поток

	1				
0	0	1			
0	1	1/0	1	1	
		0	1	0	1
			0		
			0		

На основе данных таблицы рассчитывается задержка для каждой задачи. При этом каждая ячейка имеет 0 с для случая летающих вычислений и каждая ячейка имеет 1 с для случая вычислений на граничном облачном сервере.

Исходные данные для моделирования приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры моделирования

Параметр	Значение
Число задач N	15
Объем данных S_i	10–30 МВ
CPU циклы C_i	1900 Cycle/s
Длительность $T_i^{\text{constraint}}$	0,002 s
Скорость передачи данных $D_{\text{IoT}}, D_{\text{UAV}}$	3–9 Mbps
Частота процессора UAV-МЕС (F_{UAV})	500 MHz
Частота процессора сервера граничных вычислений (F_{server})	10 GHz

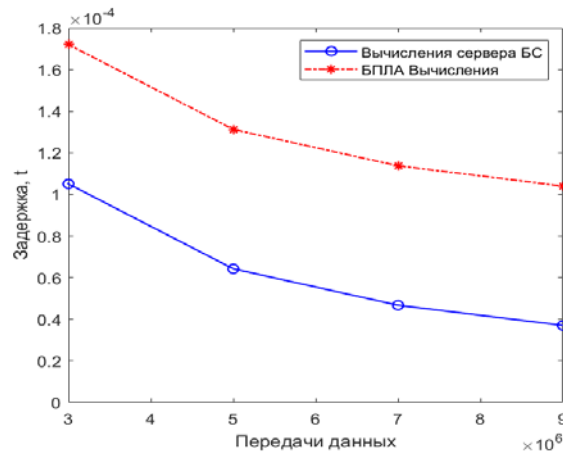


Рисунок 11– Задержка в зависимости от скорости передачи данных

На рисунке 11 приведены характеристики задержки в зависимости от скорости передачи данных. Как видим, задержка уменьшается всякий раз, когда скорость передачи данных увеличивается, когда узлы IoT (наземные датчики) выгружают все задачи на UAV-МЕС или на граничный облачный сервер.

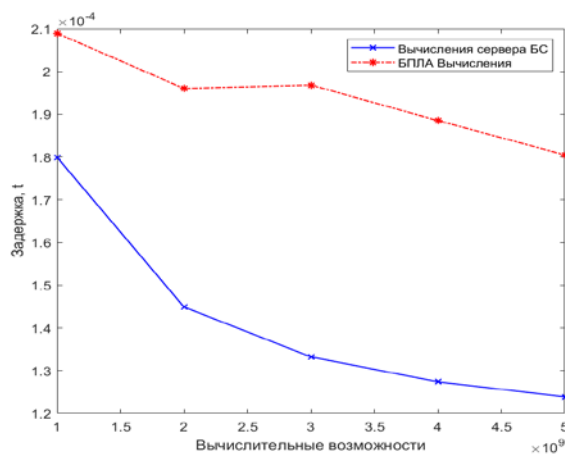


Рисунок 12 – Задержка в зависимости от вычислительных возможностей

На рисунке 12 показана зависимость задержки от вычислительных возможностей в случае применения летающих вычислений и вычислений на граничных облачных серверах. Из рисунка видно, что общая задержка уменьшается при увеличении вычислительной мощности, когда узлы IoT (наземные датчики) выгружают задачи на UAV-МЕС или на граничный облачный сервер.

На рисунках 13 и 14 задержка увеличивается линейно с увеличением объема данных и числа задач, генерируемых узлами IoT (наземными датчиками). Как показано на рисунке, общая задержка максимальна, когда задачи выгружаются и выполняются в UAV-МЕС или удаленно на граничном облачном сервере. Задержка в случае летающих вычислений намного выше, чем задержка в случае граничного облачного сервера, поскольку вычислительная мощность граничного облачного сервера намного выше, чем вычислительная мощность БПЛА-МЕС.

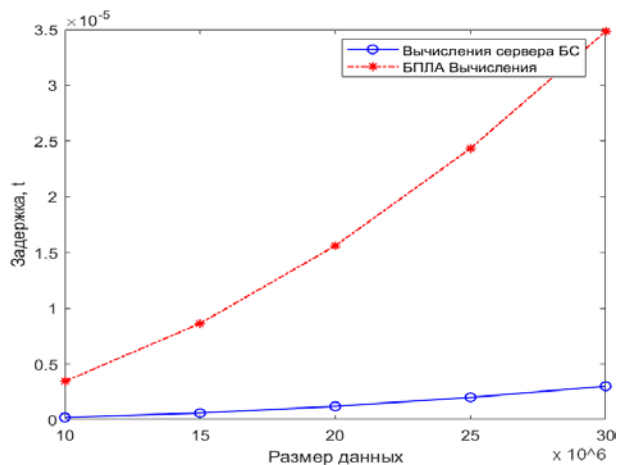


Рисунок 13 – Задержка в зависимости от объема данных

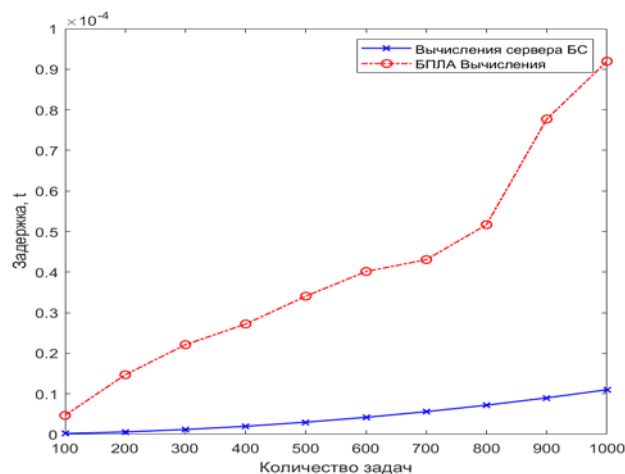


Рисунок 14 – Задержка в зависимости от числа задач

Соответственно, для уменьшения задержки выполнения вычислительной задачи необходимо увеличить либо вычислительную мощность БПЛА- МЕС, либо увеличить количество БПЛА- МЕС, как показано на рисунке 15.

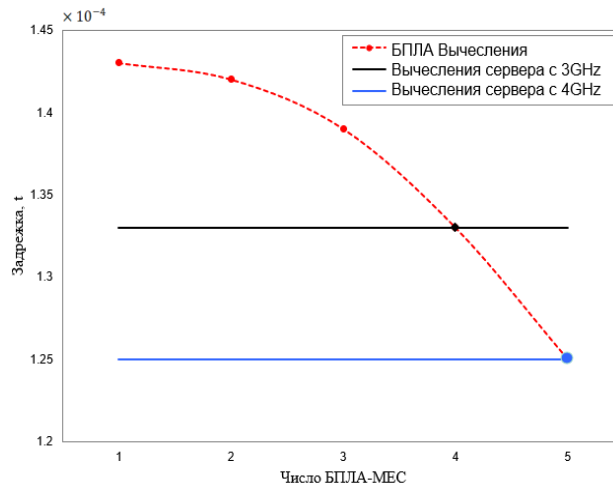


Рисунок 15 – Задержка в зависимости от числа БПЛА-МЕС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований в диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Сети связи при использовании БПЛА могут быть развернуты намного быстрее, что делает их особенно подходящими для чрезвычайных ситуаций и других подобных явлений, а также в условиях труднодоступной местности и малонаселенных районов.

2. С помощью низколетящих БПЛА в большинстве сценариев могут быть установлены линии связи прямой видимости (LoS), что потенциально приводит к значительному улучшению качества обслуживания.

3. Гибкость в развертывании сети при использовании БПЛА открывает новые возможности для повышения производительности сети и использования ее ресурсов за счет возможности динамического изменения положения БПЛА и его телекоммуникационных возможностей для наилучшего соответствия существующим в конкретный момент времени характеристикам пространства окружения сети связи.

4. Проанализированы решения по SDN с одним контроллером в ядре сети и мульти контроллерные SDN. Нам основе этого анализа были рассмотрены решения по использованию SDN совместно с БПЛА.

5. Использование SDN совместно с БПЛА дает большие преимущества при развертывании сети БПЛА, которые могут как повысить эффективность сетевой структуры БПЛА в целом, так и снизить энергопотребление БПЛА, а также ускорить развертывание сети и уменьшить ее стоимость.

6. В отличие от известных моделей трафика была предложена модель, в которой к трафику Интернета Вещей и трафику Тактильного Интернета добавляется трафик дополненной реальности. При этом было установлено, что вероятность потерь пакетов для трафика AR больше, чем для трафика IoT и меньше, чем для трафика TI, а

входящий агрегированный поток трафика IoT, TI и AR является самоподобным с параметром Херста $H = 0,7$.

7. Предложенная модель дает возможность оценить не только качество обслуживания объединенного потока трафика услуг интернета вещей, тактильного интернета и дополненной реальности, но также задержку доставки и вероятность потери пакета. Применение модели позволило изучить зависимость качества обслуживания от свойств объединяемых потоков трафика и зависимость свойств обслуженного потока от интенсивности нагрузки. Увеличение интенсивности нагрузки приводит к доминированию влияния свойств системы обслуживания, а ее снижение – к доминированию свойств входящего потока.

8. Результаты моделирования показали, что параметры качества обслуживания трафиков интернета вещей и других современных приложений заметно различаются при обслуживании совокупного потока. При изучении обслуживания агрегированного трафика установлено, что для него вероятность потери пакета больше, чем для трафика интернета вещей. Кроме того, эта разница становится более существенной при увеличении интенсивности поступающей нагрузки.

9. Гетерогенный характер трафика в сетях связи пятого и последующих поколений для обеспечения характеристик качества обслуживания и качества восприятия требует использования всех доступных ресурсов для обслуживания трафика таких сетей, в том числе и ресурсов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

10. Проведен анализ возможности и эффективности совместного использования технологий программно-конфигурируемых сетей, граничных вычислений и БПЛА как одиночных, так и групп БПЛА.

11. Разработан метод построения сети с использованием БПЛА, в котором элементы программно-конфигурируемых сетей полностью реализованы на БПЛА, отличающийся от известных тем, что уровень передачи данных реализован на группах БПЛА, объединенных в кластеры и выполняющих функции коммутаторов сети SDN, а уровень управления реализован на отдельных привязных БПЛА, выполняющих функции контроллеров сети SDN. При этом каждый из контроллеров взаимодействует с головным узлом своего кластера БПЛА, предусмотрено также взаимодействие контроллеров между собой.

12. Для решения задачи кластеризации БПЛА использованы два метода: k -средних и FOREL. По результатам исследований для дальнейших работ по кластеризации сетей БПЛА рекомендовано использовать метод k -средних с разработкой соответствующего алгоритма.

13. Разработан алгоритм кластеризации для группы БПЛА на основе метода k -средних, позволяющий найти рациональные координаты для размещения контроллеров, отличающиеся от исходных на величину до 100м в квадрате 1 км на 1 км.

14. Разработан метод выгрузки трафика с наземной сети на БПЛА, отличающийся от известных тем, что выгрузка может быть осуществлена как непосредственно на БПЛА, так и на БПЛА, оборудованный ретранслятором для передачи информации на граничный и/или облачный сервер наземной сети.

15. Разработан алгоритм выгрузки трафика для предложенного метода, основанный на алгоритме динамического программирования, использующего расстояние Хэмминга в качестве критерия для завершения своей работы и определены значения задержки для выбора размера группы БПЛА, при котором задержка для выгрузки трафика с наземной сети на группу БПЛА будет меньше, чем в случае использования БПЛА как ретранслятора для граничного/облачного сервера.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях

1. Алзагир, А.А. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений / А.А. Алзагир, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2022. – № 6. – С. 2-7.

2. Алзагир, А.А. Алгоритмы кластеризации для БПЛА в сетях пятого и последующих поколений / А.А. Алзагир, В.Н. Коваленко, А.С. Бородин [и др.] // Электросвязь. – 2022. – № 10. – С. 9-15.

3. Alzaghir, A. Flying Fog Mobile Edge Computing Based on UAV-Assisted for IoT Nodes in Smart Agriculture / A. Alzaghir // Proceedings of Telecommunication Universities. – 2022. – Vol. 8, No. 4. – P. 82-88.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных базах данных

4. Alzaghir, A. Estimation of Quality of Service in Tactile Internet, Augmented Reality and Internet of Things / A. Alzaghir, A. Paramonov, A. Koucheryav // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Vol. 13158 LNCS. – P. 35-45.

5. A. Alzaghir, Clustering algorithms for UAV placement in 5G and Beyond Networks / V. Kovalenko, A. Alzaghir, A. Volkov [et al.] // 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2020, Brno, 05–07 октября 2020 года. – Brno: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. – P. 301-307.

6. Alzaghir A., Multi Task Multi-UAV Computation Offloading Enabled Mobile Edge Computing Systems/A. Alzaghir, A. Koucheryavy // Communications in Computer and Information Science. – 2022. – Vol. 1552. – P. 3-17.

7. Ali R. Abdellah, “Deep learning approach for predicting energy consumption of drones based on MEC” / Ali R. Abdellah, Abbas Alzaghir, Andrey Koucheryavy // Y. Koucheryavy et al. (Eds.): NEW2AN 2021/ruSMART 2021, Springer Cham. LNCS, Vol. 13158, pp 284–296, 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-030-97777-1_24.

8. Abbas Alzaghir, Predicting energy consumption for UAV-enabled MEC using Machine Learning Algorithm / Abbas Alzaghir, Ali R. Abdellah, Andrey Koucheryavy // Y. Koucheryavy et al. (Eds.): NEW2AN 2021/ruSMART 2021, Springer cham. LNCS, Vol. 13158, pp 297–309, 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-030-97777-1_25.

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях
и материалах научных конференций**

9. Алзагир, А.А. Построение сети БПЛА с поддержкой SDN/NFV технологий / В.Н. Коваленко, А.А. Алзагир, А.С.А. Мутханна // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 71-85.

10. Алзагир, А.А. Разгрузка трафика при интеграции БПЛА и граничных вычислительных систем / А.А. Алзагир, А.Е. Кучерявый // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2022. – № 1(77). – С. 115-116.

11. Алзагир, А.А. Разработка методов применения БПЛА для обеспечения устойчивости сетей связи 2030 / М.И. Филимонова, А.А. Алзагир, А.С.А. Мутханна // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2020. – № 1(75). – С. 164-165.

12. Алзагир, А.А.Х. Применение беспилотных летательных аппаратов в сетях 5G / А.А.Х. Алзагир, А.С.А. Мутханна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). IX Международная научно-техническая и научно-металлическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. 2020. Т. 1. – С. 49-53.