

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Санкт Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕГРАЦИИ РЕСУРСОВ БПЛА И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ	13
1.1. Обзор исследований в области сетей связи пятого поколения и беспилотных летательных аппаратов.....	13
1.2. Классификация беспилотных летательных аппаратов.....	16
1.3. Использование БПЛА для поддержки беспроводных сетей.	20
1.3.1 Использование БПЛА для сбора информации с беспроводных сенсорных сетей.	20
1.3.2 Использование БПЛА для сбора информации с сетей Интернета вещей.....	22
1.4.Использование БПЛА для обеспечения связности в наземных сетях связи.....	24
1.4.1 БПЛА в качестве дополнительной воздушной базовой станции.	25
1.4.2 БПЛА в качестве ретранслятора.....	27
1.4.3 БПЛА в качестве летающего беспроводного транзитного узла для базовых станций наземной сети.	28
1.5 Использование БПЛА в качестве узла граничных вычислений и для кэширования.	29
1.5.1 Граничные вычисления на базе БПЛА.....	30
1.5.2 Использование БПЛА для кэширования контента.	32
1.6 Выводы.....	33
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ.....	35
2.1 Введение.....	35
2.2 Архитектура программно-конфигурируемых сетей.....	37
2.3 Программно-конфигурируемые сети с одним контроллером.....	41
2.4 Программно-конфигурируемые сети с несколькими контроллерами.	43
2.5 Программно-конфигурируемые сети и БПЛА.	51

2.6 Выводы.....	53
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПЯТОГО И ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ.....	55
3.1 Введение.....	55
3.2 Анализ концепций Интернета Вещей, Тактильного Интернета и дополненной реальности.....	57
3.2.1 Концепция Интернета Вещей.....	57
3.2.2 Концепция Тактильного Интернета.....	60
3.2.3 Концепция дополненной реальности.....	61
3.3. Анализ моделей трафика.....	62
3.3.1 Модели трафика для традиционных услуг сетей связи.....	62
3.3.2 Системы массового обслуживания.....	66
3.4 Разработка комплексной модели трафика для реализации на сети услуг интернета вещей, тактильного интернета и дополненной реальности.....	70
3.4.1 Системная модель и постановка задачи.....	70
3.4.2 Аналитическая модель.....	71
3.4.3 Имитационная модель.....	72
3.4.4 Результаты моделирования.....	76
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫГРУЗКИ ТРАФИКА ПРИ ИНТЕГРАЦИИ РЕСУРСОВ БПЛА И ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГРАНИЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.....	82
4.1. Введение.....	82
4.2 Архитектура сети БПЛА для сенсорных сетей.....	85
4.3 Применение SDN в сетях БПЛА.....	87
4.4 Разработка метода выгрузки трафика из наземной сети на БПЛА, когда базовые станции используются в качестве контроллеров и когда БПЛА используются в качестве контроллеров SDN.....	89

4.4.1 Алгоритмы кластеризации k -средних и FOREL.	92
4.4.2 Постановка задачи кластеризации.....	95
4.4.3 Результаты моделирования.....	101
4.5 Разработка метода выгрузки трафика из наземной сети на БПЛА при размещении на БПЛА узла МЕС и при использовании БПЛА в качестве ретранслятор.	104
4.5.1 Мобильные граничные вычисления МЕС и БПЛА.	105
4.5.2. Системная модель и сценарий.	107
4.5.3 Вычислительная модель.	109
4.5.4 Постановка задачи.	111
4.5.5 Алгоритм выгрузки.	112
4.5.6 Результаты моделирования.....	114
4.6 Выводы.	119
Заключение.	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	124
ПРИЛОЖЕНИЕ	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Развитие сетей связи в настоящее время происходит в направлении создания гетерогенных сетей. Начиная 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. Мутханни, А.А.А. Ateya, M. Dohler, M. Maier, и других.

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, а 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-Петербургский государственный университет 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 1км на 1км.

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.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической и научно-методической конференции и семинарах: конференциях DCCN (International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications) в 2021 года. NEW2AN (International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking) в 2021 года. ICUMT(The International Congress On Ultra Modern Telecommunications And Control Systems) в 2020 года. СПбНТОРЭС (75-я и 77-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио) в 2020 и 2022 годах. АПИНО (Актуальные Проблемы Инфотелекоммуникаций В Науке И Образовании) в 2020 года.

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 12 работ, 1 из которых опубликована единолично. В числе опубликованных работ – 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих

в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации (из них 3 в изданиях, соответствующих искомой специальности), 5 статья в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS (Q2), 4 работы в журнале и сборнике 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕГРАЦИИ РЕСУРСОВ БПЛА И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

1.1. Обзор исследований в области сетей связи пятого поколения и беспилотных летательных аппаратов

Беспроводные сети и системы связи значительно улучшились за последние несколько лет благодаря инновациям, техническим и академическим исследованиям. В настоящее время основное внимание уделяется развитию сетей связи пятого и последующих поколений. Эти сети принципиально отличаются от существующих не только за счет высоких скоростей, но и за счет перехода к реализации концепций Интернета Вещей [1, 2] и Тактильного Интернета [3, 4]. Последние предусматривают совершенно новые характеристики сетей: сверхплотность и ультра малые задержки [5, 6]. И только этим особенности сетей связи пятого и последующих поколений не исчерпываются. Эти сети становятся гетерогенными в широком смысле этого слова, что приведет к созданию на этапе развертывания сетей связи шестого поколения так называемых сетей SAGSIN (Space, Air, Ground, Sea Integrated Network) [7, 8], которые будут представлять собой единую сеть для всех пользователей. Следует отметить, что эти новые технологии переносят мир за пределы проектирования сетей с мобильных устройств на системы, которые могут подключаться к различным устройствам на высоких скоростях [9, 10].

Остановимся более подробно на сетях связи пятого поколения, широкомасштабное внедрение которых ожидается в ближайшем будущем. Сети связи пятого поколения будут многослойными [11, 12], масштабируемыми, как

уже отмечалось гетерогенными, а также динамически изменяемыми. Кроме того, сети связи 5G поддерживают высокую связность и гарантированный уровень качества обслуживания QoS для очень большого числа устройств (сверхплотная сеть). При этом, естественно, возникают и новые научно-исследовательские задачи, например, по большим данным. Однако не только задачи, связанные со сверх плотностью и/или ультра малыми задержками образуют множество научно-исследовательских задач при разработке и внедрении сетей связи пятого и последующих поколений. Большое число задач образуется за счет гетерогенности этих сетей и необходимости использования различных технологий. В диссертационной работе далее будет исследована проблема применения беспилотных летательных аппаратов для реализации услуг пользователям в сетях связи пятого и последующих поколений, занимающая важное место в исследованиях уже сегодня и являющаяся одной из прародительниц сетей SAGSIN [7, 8].

В 2023 году объем мобильных данных, передаваемых через сети связи, превысит 100 экзабайт в месяц от 31,6 миллиарда устройств, что почти в 2 раза превышает существующий уровень. Эти результаты во многом определяются технологиями сетей связи пятого поколения, внедрение которых стремительно набирает темп. Хотя среднее число ресурсов на пользователя не столь велико, беспрецедентный рост числа этих устройств требует оптимизации сетевой структуры и распределения ресурсов [13]. Основываясь на результатах исследований Международного Союза Электросвязи, можно выделить три следующих важных технологических системных решений при внедрении сетей связи пятого поколения [14]:

✓ Расширенная мобильная широкополосная связь eMBB (Enhanced Mobile Broadband) обеспечивает существенно большую пропускную способность, а также улучшение характеристик задержки в сетях связи пятого и последующих поколений. Это будет способствовать развитию использования мобильного

широкополосного доступа и скорости передачи данных, которая будет достаточной для удовлетворения потребностей в доступе к высокоскоростным данным для новых услуг, таких как передача видео, 3D, UHD (Ultra-High-Definition), AR/VR. Кроме того, такие решения будут очень полезны для районов с более интенсивным движением, таких как города, стадионы и концертные площадки.

✓ Массивная взаимосвязь машинного типа МТС (Massive machine-type communication). Целью этой технологии является обеспечение соединений в условиях высокой плотности для очень большого числа устройств (до 200,000 устройств/кв. км) с низким энергопотреблением (длительность жизненного цикла батареи до 15 лет) и небольшой скоростью передачи (1–100 кбит/с на устройств). Эта технология относится к таким приложениям как сенсорные сети, Интернет Вещей, умные города, носимые устройства и т.д.

✓ Сверх высоко надежные сети с ультра малыми задержками uRLLC (ultra-reliable low latency communication) [15, 16]. Эта технология предусматривает обеспечение задержки величиной в 1мс и коэффициента готовности сети 0,999999. Примерами приложений для таких сетей являются Тактильный Интернет, управление поездами на высокой скорости, беспилотные автомобили с сетевой поддержкой, управление роботами и т.д.

Одним из важнейших приложений в сетях связи пятого поколения является использование для обеспечения услугами пользователей и связности сети беспилотных летательных аппаратов БПЛА. Использование БПЛА в сетях связи пятого поколения может быть весьма разнообразным как для коммерческого, так и общественного применения. В качестве примеров предоставляемых услуг можно привести поисковые работы на местности, картографирование, обеспечение связью в условиях стихийных бедствий, поддержание необходимого уровня связности сети, управление трафиком и т.д. Кроме того, БПЛА могут быть эффективно использованы в необходимых случаях для обеспечения ультра малой

задержки, характеристик надежности, обслуживания пиковой нагрузки и т.п. БПЛА могут также быть эффективно использованы для временного расширения сети базовых станций для обеспечения покрытия и распределения ресурсов сети, при массовых мероприятиях на стадионах и в иных местах скопления людей, для сетевой поддержки сетей Интернета Вещей, беспроводных сенсорных сетей и т.д. Не случайно поэтому, что БПЛА становятся неотъемлемой частью архитектуры современных сетей связи.

1.2. Классификация беспилотных летательных аппаратов

Для создания любых летающих сетей или телекоммуникационных платформ важнейшим является выбор типа, используемого БПЛА [17]. Выбор типа БПЛА определяется различными требованиями к создаваемой сети или платформе, такими как требуемый уровень QoS, характеристики энергопотребления, внешние условия, регуляторные нормы [18]. Существуют различные классификации БПЛА по таким характеристикам как высота полета, поднимаемый вес, метод управления, класс воздушного судна, уровень автономности полета, привязные БПЛА [19] и т.д. Основываясь на известных классификациях, используем для классификации БПЛА с сетевой точки зрения следующую: низколетящие БПЛА, высотные БПЛА и спутники, как это приведено в таблице 1.1. В таблице 1.1 приведена классификация БПЛА с учетом указанного выше деления на классы и необходимых критериев для выбора БПЛА для построения сети и/или платформы [19].

Таблица 1.1 – Классификация БПЛА

Критерий	<i>Низколетящие БПЛАs</i>	<i>Высотные БПЛАs</i>	<i>Спутники</i>
Высота	Up to 10000 м	Up to 23000 м	Up to 36000 м
Метод управления	Ручной	Пропеллер	Баллистический
Уровень автономности управления	Гибкий	Менее гибкий	Не автономный
Время развертывания	Короткое	Среднее	Длительное
Полетное время	До 40 минут	До 100 дней	До 15 лет
Нагрузка	До 7 кг	До 1000 кг	До 25000 кг
Покрытие	Среднее	Большое	Полное
Зона прямой видимости	Малая	Средняя	Полная
Функциональность	Простая	Средняя	Сложная
Расстояние полета	До 200 км	До 20 миллионов километров	Неопределенная
Мобильность	Квазистационарный, высокомобильный	Менее мобильный	Квазистационарный
Энергетическая установка	Батареи	Топливо	Солнечная энергия
Примеры	Дроны	Дирижабли	Геостационарные спутники

і. Низколетящие БПЛА

Низколетящие БПЛА представляют собой квазистационарные высокомобильные БПЛА (например, дроны) с высокой степенью мобильности и высотой полета ниже стратосферы [20, 21]. Развертывание таких БПЛА может быть осуществлено очень быстро и простейшим путем. Свойства низколетящих БПЛА делают их незаменимой сетевой составляющей при реализации концепции широкополосной спутниковой связи [22], а также при использовании в сетях 3G, 4G, 5G, B5G и даже 6G. Низколетящие БПЛА, в основном, обеспечивают взаимосвязь в зоне прямой видимости, что минимизирует энергетические затраты. Кроме того, мобильность низколетящих БПЛА позволяет гибко изменять

местоположение и максимизировать покрытие с одновременным уменьшением потребления энергии. В случае отказа какого-нибудь из низколетящих БПЛА он может быть достаточно легко заменен, если это требуется.

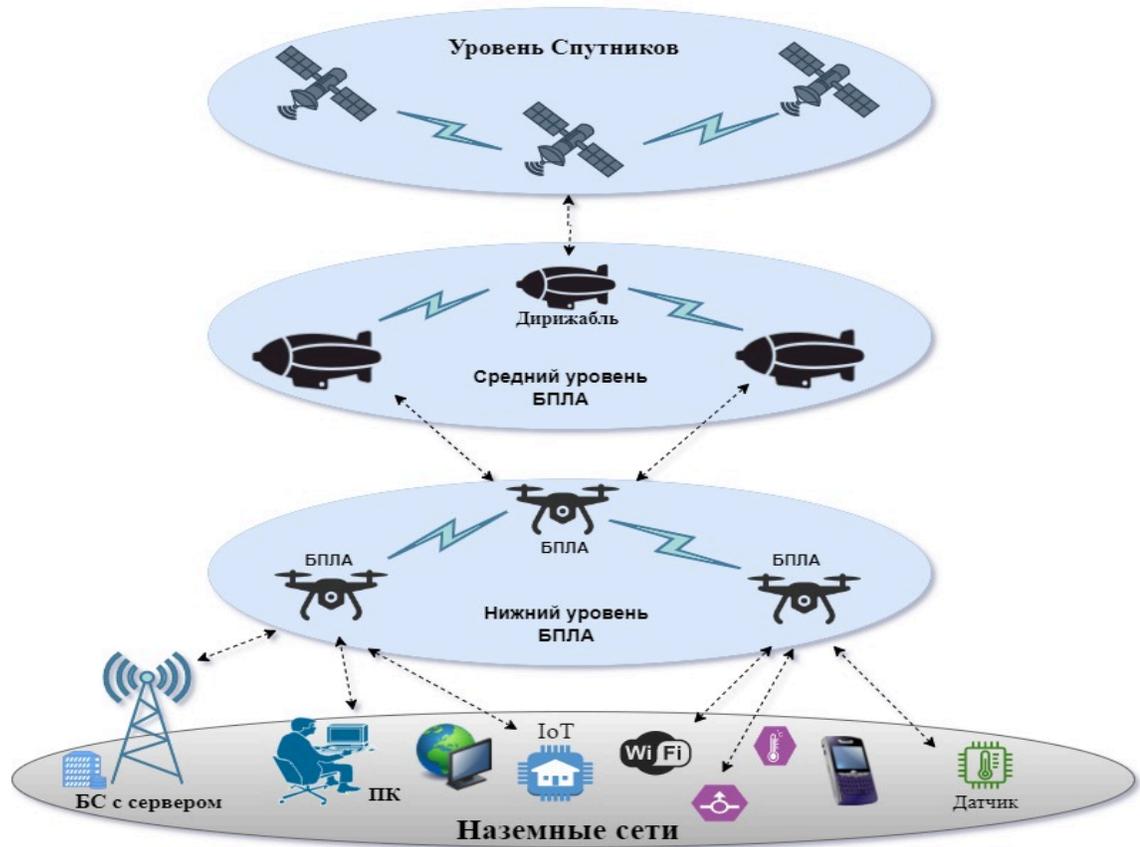


Рисунок 1.1 – Различные классы БПЛА в сетях связи

ii. *Высотные БПЛА*

Высотные БПЛА (дирижабли) представляют собой другую беспилотную воздушную платформу, которая также представляет интерес для развития беспроводных телекоммуникаций. Высотные БПЛА рассматриваются как беспилотные платформы с меньшей мобильностью, но с возможностью размещения в стратосфере [23]. Высотные БПЛА могут обеспечить такие возможности как крупномасштабное покрытие географических площадей, меньшие по сравнению со спутниками задержки, высокие скорости обмена информацией и, естественно, большее время функционирования, чем

низколетящие БПЛА [24]. Их развертывание может обеспечить, например, длительную связность между регионами [25]. Однако, есть и целый ряд недостатков у высотных БПЛА: большое потребление энергии, высокие экономические затраты и большая интерференция.

iii. Спутники

Спутники можно рассматривать как беспилотные летательные аппараты, расположенные в космическом пространстве на орбитах вокруг земного шара [26]. Они могут быть развернуты для проведения научных исследований, в коммерческих целях, для обеспечения функционирования глобальных систем позиционирования и т.д.[27]. В настоящее время вокруг Земли вращается большое количество спутников. Однако с точки зрения наземных пользователей подвижность спутников считается стационарной. Как правило, спутники питаются от солнечной энергии, весят много тонн и обходятся непомерно дорого. В зависимости от высоты полета спутники можно разделить на низкоорбитальные (700-2000 км), средне орбитальные (8000-20000 км), геостационарные (35786 км) и имеющие высокие околоземные орбиты (до 42000 км) [28]. В дополнение к существующим услугам, предоставляемых пользователям спутниками, современные услуги также могут быть реализованы с использованием спутников в будущей беспроводной сети. Спутники могут обеспечивать транзитную или непосредственную связь как с высотными, так и с низколетящими БПЛА. Однако стоит отметить, что такое решение может не подходить для некоторых приложений. Очень большое расстояние, которое отделяет спутники от низколетящих БПЛА или высотных БПЛА, приводит к значительной задержке, которая не подходит для приложений, чувствительных к задержке таких, как Тактильный Интернет.

1.3. Использование БПЛА для поддержки беспроводных сетей

Широкий спектр использования БПЛА (дронов) для беспроводных сенсорных сетей может быть подразделен на два основных направления: БПЛА функционирует как часть инфраструктуры беспроводной сети и БПЛА функционирует как мобильный терминал. В первом случае БПЛА может рассматриваться, например, как мобильная базовая станция для поддержки наземных устройств. Во втором случае БПЛА рассматривается как пользовательское оборудование, расположенное в воздушной массе, генерирующее нагрузку в соответствии с требуемыми для БПЛА приложениями.

1.3.1 Использование БПЛА для сбора информации с беспроводных сенсорных сетей

Беспроводные сенсорные сети WSN (Wireless sensor networks) представляют собой сети сенсоров и/или актуаторов, которые собирают и генерируют данные об окружающей среде, процессах, явлениях и т.п. Данные передаются на соответствующие серверы для последующей обработки. Сенсорные узлы представляют собой миниатюрные устройства, которые обладают ограниченными ресурсами и не могут передавать данные на значительные расстояния. Таким образом, БПЛА могут быть эффективно использованы для сбора данных с сенсорных сетей и их передачи, обладая существенно лучшими энергетическими характеристиками, чем наземные сенсорные узлы. Беспроводная сенсорная сеть с поддержкой БПЛА изображена на Рисунке 1.2. Как видим, сбор данных и

передача их на удаленную базовую станцию осуществляются в процессе пролета БПЛА над беспроводной сенсорной сетью, хотя используется и иной вариант – доставка данных непосредственно на пункт управления полетом БПЛА.

Идея разворачивания БПЛА над сенсорными сетями (или сенсорными полями) рассматривалась многими исследователями. Авторы в [28] предложили протокол маршрутизации для WSNs, основанный на поддержке сети со стороны БПЛА. Стратегия маршрутизации была адаптирована к наземной беспроводной сенсорной сети для создания кластеров и обеспечения сбора данных с наземных сенсорных узлов. В [29] авторы оптимизировали совместно расписание пробуждения и засыпания наземных сенсорных узлов и траекторию полета БПЛА с целью минимизации энергопотребления наземных элементов сети и одновременной максимизации объема данных, собираемых с каждого наземного сенсорного узла. При этом предполагалось, что БПЛА осуществляет пролет на одной и той же высоте. В [30] энергетически эффективный протокол сбора данных с использованием БПЛА был предложен. БПЛА разворачивались в пространстве при этом над сенсорным полем, организованным в кластеры. Такой подход далее широко использовался для беспроводных сенсорных сетей. При такой стратегии выбирался оптимальный путь для сбора данных посредством БПЛА, когда данные собирались только с головных сенсорных узлов.

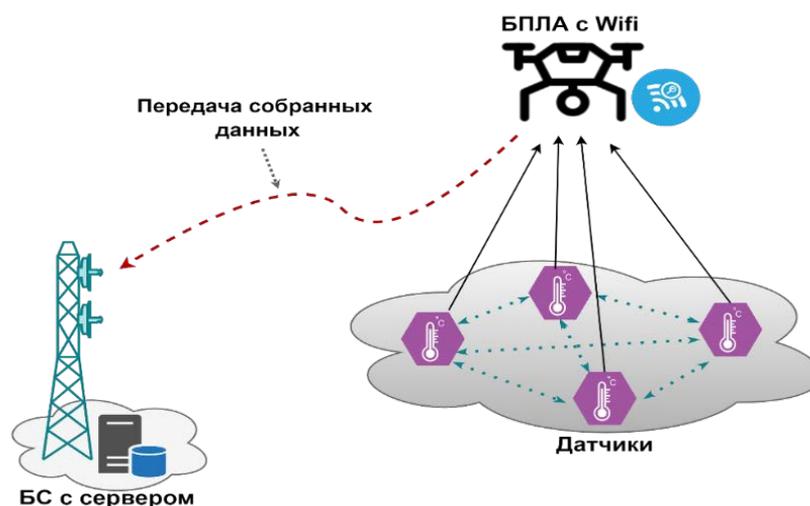


Рисунок 1.2 – Сбор данных с сенсорных полей с использованием БПЛА.

1.3.2 Использование БПЛА для сбора информации с сетей Интернета вещей

Точно так же, как и для беспроводных сенсорных сетей устройства Интернета Вещей представляют собой зачастую миниатюрные изделия, имеющие ограниченные ресурсы батареи для сбора данных. Эти IoT устройства не могут обеспечить транзит данных на большие расстояния из-за ограниченных возможностей энергетических ресурсов. Как правило, этот транзит данных осуществляется либо через многочисленные транзитные узлы сети Интернета Вещей, либо через ретрансляторы, что приводит к увеличению задержек и ошибок [31]. При этом взаимодействие с БПЛА может обеспечить как непосредственно сбор данных, так и передачу данных на главный сервер [32]. При этом взаимодействие между БПЛА и IoT устройствами для сбора и передачи данных может быть обеспечено в реальном времени. Таким образом, непосредственное взаимодействие БПЛА и Интернет вещей уменьшает требуемую энергию для передачи информации посредством использования расстояния между IoT устройством и ближайшим БПЛА вместо расстояния до находящейся достаточно далеко базовой станции, что увеличивает в свою очередь длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети [33, 34]. Кроме того, сеть БПЛА может быть развернута в разнообразном местоположении, перенося при этом соответствующую нагрузку, в любое время и везде. Существующие преимущества взаимодействия БПЛА и IoT включают в себя также более низкую стоимость, лучшую связность и доставку данных с высоким качеством обслуживания. БПЛА начинают играть ведущую роль в обеспечении услуг доставки данных в сетях Интернета Вещей и сбора данных с устройств. При этом БПЛА сами оборудуются устройствами Интернета Вещей, которые могут включать сенсоры, цифровые камеры, актуаторы и телекоммуникационные технологии, такие как Wi-Fi.

Это оборудование эффективно используется для удаленного управления устройствами, сбора данных и услуг доставки. Как видим, БПЛА могут собирать данные от IoT устройств посредством оборудования, которое создает дополнительную нагрузку на сам БПЛА. Услуги доставки данных осуществляются БПЛА через беспроводные технологии, такие как WiFi, LTE и 5G. Сети 4G/5G при этом имеют наилучшие возможности для повышения эффективности использования БПЛА, оборудованных сенсорами, камерами, приемниками GPS, ГЛОНАСС. Используя БПЛА как ретранслятор для IoT можно существенно улучшить характеристики надежности и энергопотребления. Действительно, БПЛА позволяет при сборе данных с наземных устройств IoT минимизировать мощность передатчиков, обеспечивая при этом лучшую надежность. Кроме того, в таких сценариях энергопотребление IoT устройств существенно уменьшается и БПЛА могут обслуживать наземные устройства в течение длительного времени. Кроме того, БПЛА могут также собирать информацию с таких небольших устройств как оборудование мониторинга здоровья, сенсоры окружающей среды и т.д. [35-37]. Умные БПЛА, оборудованные устройствами IoT, способны собирать, хранить и обрабатывать данные для комплексного решения задач по повышению эффективности таких сетей. Обработка и хранение данных на IoT устройствах требует высоких энергетических затрат, что не представляется возможным. Поэтому использование БПЛА для указанных целей позволяет уменьшить расход энергии и поддерживать активность и сон узлов Интернета Вещей в интересах зеленых технологий. Существует еще целый ряд сценариев, где использование БПЛА может дать значительный эффект: управление в нештатных и чрезвычайных ситуациях, общественная безопасность, сельское хозяйство и т.д. Использование БПЛА для сбора, обработки и хранения информации остается объектом пристального внимания исследователей. В [38] авторы предложили структуру оптимизации мобильности и трехмерного развертывания сети БПЛА для эффективного сбора

данных с наземного сегмента сети Интернета Вещей. Было доказано, что использование БПЛА существенно улучшает связность и энергетическую эффективность сети Интернета Вещей. Кроме того, БПЛА могут быть использованы для сбора данных в умных городах для множества приложений таких, как динамическая координация и маршрутизация данных, мониторинг инцидентов, интеллектуальные транспортные системы, восстановление после чрезвычайных ситуаций, ретрансляция данных от изолированных сегментов сенсорной сети на базовую станцию и т.д. Кроме того, сбор данных посредством БПЛА может помочь в отрасли сельского хозяйства, для многих приложений услуг, например, мониторинг качества воды, обнаружение нештатных ситуаций, раннее предупреждение о чрезвычайной ситуации и т.д.

При этом взаимодействие БПЛА IoT для сбора данных может осуществляться двумя способами:

- (i) БПЛА собирает данные с наземных устройств IoT и обеспечивает доставку данных на ближайшую базовую станцию,
- (ii) БПЛА оборудуется устройствами IoT и собирает данные с устройств IoT в умных городах.

1.4. Использование БПЛА для обеспечения связности в наземных сетях связи

Как одно из важнейших приложений БПЛА в сетях связи может рассматриваться поддержка связности между устройствами сети в условиях отсутствия инфраструктурной связности вследствие тех или иных событий в районе функционирования сети связи. Беспроводная сеть связи с поддержкой со

стороны БПЛА может использоваться и при недостаточном покрытии сети или в условиях малой плотности населения, а также в труднодоступных районах [39].

Рассмотрим далее различные варианты использования БПЛА, обеспечивающие улучшение характеристик сетей связи.

1.4.1 БПЛА в качестве дополнительной воздушной базовой станции

Этот сценарий рассматривается как один из ключевых сценариев использования БПЛА в сетях будущего. БПЛА функционирует как летающая базовая станция UAV-BS, при этом БПЛА, естественно, оснащается оборудованием для приема, обработки и передачи сигналов, помогающих существующей сотовой сети обеспечить необходимую дополнительную емкость сети в условиях каких-либо временных мероприятий. Кроме того, БПЛА может быть использован для реконфигурации телекоммуникационной инфраструктуры в условиях чрезвычайных ситуаций и ситуаций, угрожающих общественной безопасности, и даже тогда, когда существующая сеть связи полностью выведена из строя. Базовые станции воздушного базирования на БПЛА могут обеспечить услуги с очень высоким качеством обслуживания в условиях прямой видимости. Их размещение может быть оптимизировано для обеспечения необходимого покрытия и пропускной способности. Примерный сценарий функционирования БПЛА как сети базовых станций воздушного базирования приведен на Рисунке 1.3, на котором каждый из БПЛА оснащен беспроводными приемопередатчиками, позволяющими им взаимодействовать как с наземной сетью, так и с другими БПЛА. В этом сценарии может быть использован и одиночный БПЛА, и рой БПЛА. Применение БПЛА в качестве летающих базовых станций обеспечивает

существенно лучшие показатели в части покрытия, балансировки нагрузки, спектральной эффективности и пользовательского обслуживания по сравнению с существующими наземными базовыми станциями. Характеристики линий доступа к БПЛА как к летающей базовой станции, в том числе и затухания, интенсивно исследуются в литературе. В [40] авторы определяют вероятность покрытия и анализируют функционирование для сценария, когда БПЛА используется в качестве базовой станции для нисходящей линии к наземным пользователям, принимая во внимание интерференцию, которая возникает при использовании взаимодействия устройство-устройство D2D (device-to-device). В этой работе найдена оптимальная высота расположения БПЛА, что показывает уменьшение этой высоты с увеличением плотности пользователей D2D. Кроме того, в работе предложена структура определения минимального числа точек остановки БПЛА, которое необходимо для покрытия заданной зоны с минимально требуемой мощностью передачи. Было доказано, что точки остановки требуются для каждого БПЛА с целью увеличения вероятности покрытия наземных пользователей.

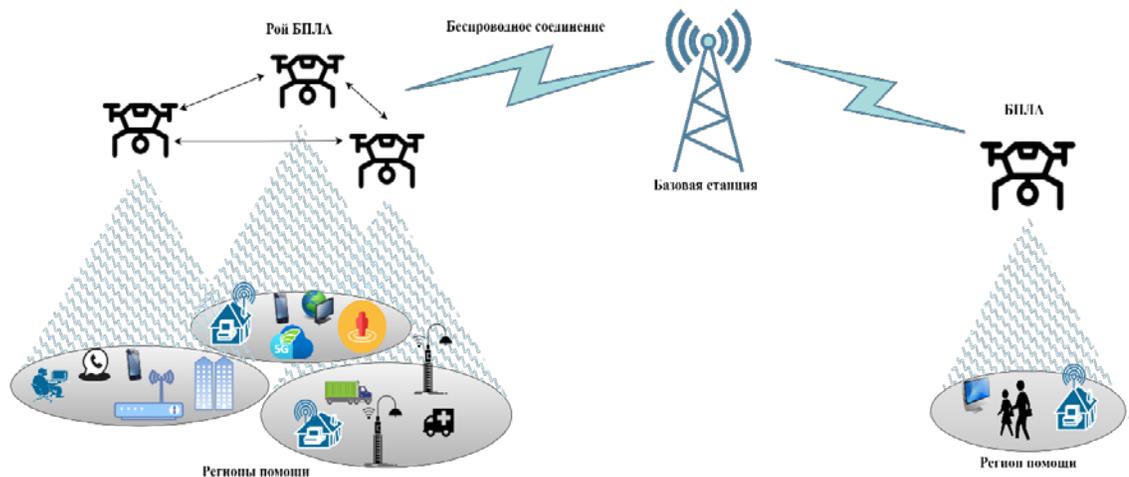


Рисунок 1.3 – БПЛА в качестве базовых станций воздушного базирования в заданной зоне наземной сети

1.4.2 БПЛА в качестве ретранслятора

В этом сценарии БПЛА используется как ретранслятор, обеспечивающий взаимодействие между удаленным пользователем и базовой станцией, с целью преодоления препятствий, например, горной гряды, как это показано на Рисунке 1.4. Как мобильный ретранслятор БПЛА имеет несколько продвинутых функций по сравнению с обычными стационарными ретрансляторами. Естественно, что мобильный ретранслятор на основе БПЛА эффективен экономически и может быть легко введен в действие в условиях необходимости, например, важного события. Кроме того, для высоко мобильного БПЛА можно выбрать наиболее подходящее место для обеспечения ретрансляции с учетом конкретных условий в конкретное время.

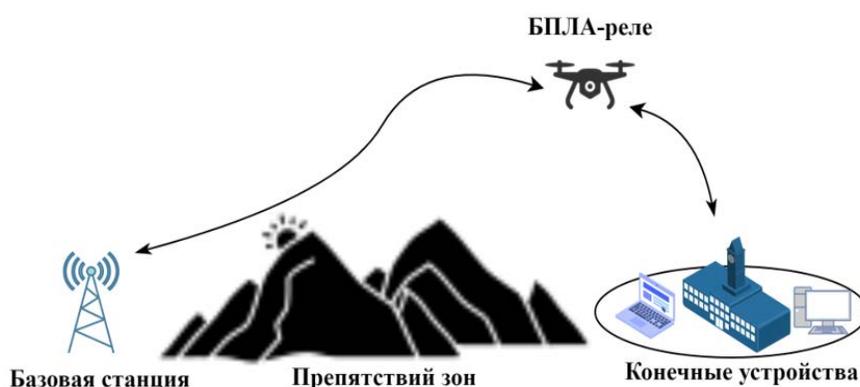


Рисунок 1.4 – Мобильный ретранслятор на основе БПЛА

Ретрансляция на базе БПЛА является эффективным решением для увеличения пропускной способности сети, характеристик надежности, увеличения радиуса охвата сети. Эти возможности использования БПЛА как ретранслятора достаточно широко изучаются в современной литературе. В [41] авторы представляют экспериментальные результаты полевого тестирования при использовании малых БПЛА как ретрансляторов для сотовых сетей связи. В этой работе доказано, что пиковая пропускная способность и ring time могут быть

существенно увеличены при интеграции БПЛА как беспроводного ретранслятора в современные сотовые сети. Потенциальные возможности использования БПЛА как ретранслятора проанализированы в работах [42–47].

1.4.3 БПЛА в качестве летающего беспроводного транзитного узла для базовых станций наземной сети

Проводная транзитная передача — это распространенный подход к подключению базовых станций к ядру сети в наземных сетях. Однако проводные соединения могут быть достаточно дорогими или нереализуемыми из-за географических ограничений, особенно при работе с сотовыми сетями с высокой плотностью. Хотя беспроводная транзитная передача является гибким и экономичным решением, она страдает от блокировок и помех, которые снижают эффективность сети радиодоступа. В таких случаях БПЛА могут играть ключевую роль, обеспечивая вертикальную транзитную связь [48]. Транзитные узлы могут быть установлены на БПЛА и соединять наземные или даже базовые станции воздушного базирования с ядром сети на земле. При этом БПЛА могут сыграть ключевую роль в обеспечении рентабельной, надежной и высокоскоростной беспроводной транзитной сети для наземных сетей [49]. В частности, беспилотные летательные аппараты могут быть оптимально размещены, чтобы избежать препятствий и обеспечить надежную связь по линии прямой видимости. Более того, использование БПЛА с возможностями связи в диапазоне миллиметровых волн (mmWave) может обеспечить беспроводные транзитные соединения с высокой скоростью передачи данных, которая необходима для удовлетворения высоких требований к трафику в районах с высокой нагрузкой со

стороны пользователей [50]. БПЛА также могут создавать реконфигурируемую сеть в небе и обеспечивать возможности беспроводного транзита по линии связи прямой видимости с несколькими участками. На Рисунке 1.5 показан пример беспроводного транзита на основе БПЛА для двух базовых станций, которые либо развернуты на большом расстоянии, либо имеют поврежденный проводной транзит, либо не имеют возможности быть соединены по линиям прямой видимости. Таким образом, гибкие транзитные сети на основе БПЛА могут значительно повысить надежность, пропускную способность и уменьшить эксплуатационные расходы на транзит в наземных сетях.

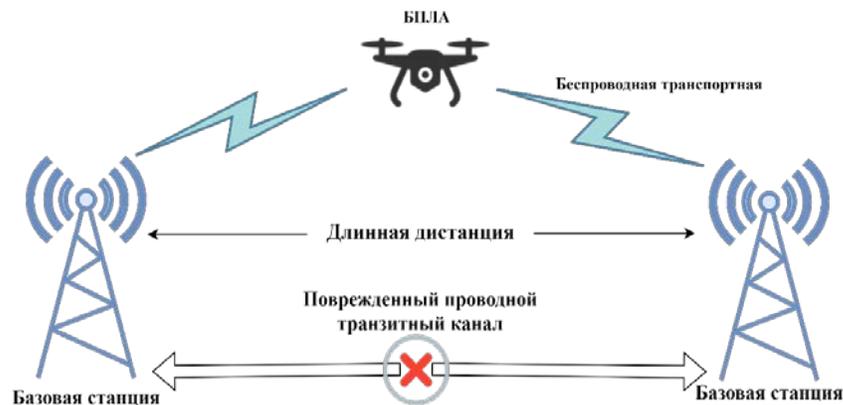


Рисунок 1.5 – БПЛА как транзитный узел для двух базовых станций

1.5 Использование БПЛА в качестве узла граничных вычислений и для кэширования

В беспроводной сети 5G предусмотрены разнообразные ресурсы для поддержки массивного трафика и различных услуг. В основе этих решений лежит теория конвергенции связи, вычислений и кэширования [51]. Являясь неотъемлемой частью сетей 5G, БПЛА может выступать в качестве платформы

граничных вычислений для предоставления гибких и отказоустойчивых услуг наземным пользователям с ограниченными возможностями обработки, таким как IoT, а также может обеспечить кэширование популярного контента для снижения транзитного трафика и, соответственно, задержки в период пиковой нагрузки.

1.5.1 Граничные вычисления на базе БПЛА

Из-за ограниченного заряда батареи и низких вычислительных возможностей устройствам с ограниченными ресурсами, например, Интернета Вещей, сложно предоставлять услуги в реальном времени. Принципиальное решение таких проблем стало возможным с появлением концепции граничных вычислений MEC (Mobile Edge Computing) [52]. С развертыванием MEC вычислительные задачи могут быть перенесены как можно ближе к границе сети, что позволяет обеспечить следующие возможности:

- Сокращение времени выполнения приложения, если удаленное устройство не имеет достаточных вычислительных ресурсов.
- Увеличение длительности жизненного цикла батареи устройства, поскольку приложение выполняется на сервере MEC.

В сетях с использованием БПЛА устройства с ограниченными ресурсами могут использовать для решения своих ресурсоемких задач летающий БПЛА, который имеет достаточные вычислительные ресурсы и, кроме того, гибкие возможности по подключению на границе сети, тем самым экономя энергию устройств и снижая трафик на стационарные облачные серверы. Как видим, БПЛА, выполняющий функции MEC, предлагает многообещающие дополнительные возможности по сравнению с обычной наземной сотовой сетью с

фиксированными базовыми станциями. Структура граничных вычислений с использованием БПЛА приведена на Рисунке 1.6, где каждое мобильное устройство может решать: использовать ли локальные вычисления, либо проводить вычисления с использованием системы граничных вычислений на БПЛА.

В реальности каждое мобильное устройство связано с ближайшим БПЛА, у которого в данный момент достаточно заряда батареи и вычислительных ресурсов. Стоит отметить, что если бортовому процессору БПЛА не хватает вычислительных ресурсов из-за небольшого размера БПЛА, это будет ограничивать эффективное выполнение сложных приложений.

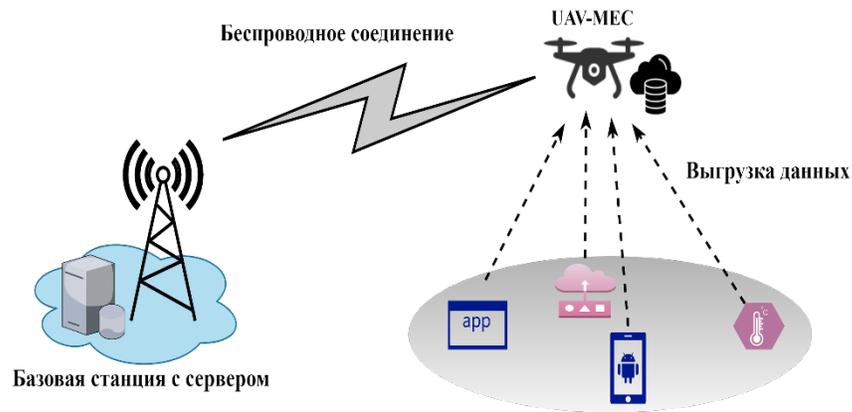


Рисунок 1.6 – БПЛА как платформа граничных вычислений

Энергетические и вычислительные возможности БПЛА могут быть виртуально улучшены за счет переноса вычислений на удаленные пограничные серверы по беспроводному каналу. Таким образом, БПЛА-MEC имеет возможность либо сам обрабатывать приложение, используя свои собственные ресурсы, либо отправлять вычислительные задачи на пограничный сервер следующего уровня для обработки в соответствии с требованиями по качеству обслуживания QoS для реализуемой услуги. Идею установки процессора граничных вычислений непосредственно на БПЛА изначально выдвинули Чжон и др. в работе [53], в которой были предложены решения по переносу вычислений на беспилотный летательный аппарат. Авторы в данной работе рассмотрели

мобильное устройство и БПЛА с целью минимизации энергопотребления мобильного устройства за счет оптимизации распределения битов для восходящей/нисходящей связи при условии заданной траектории БПЛА. После этого Чжон и др. в работе [54] представили улучшенное решение для группы мобильных устройств, проблема оптимизации распределения битов и траектории БПЛА были решены для минимизации потребления энергии мобильными устройствами с учетом задержки и ограничений энергетических характеристик БПЛА.

1.5.2 Использование БПЛА для кэширования контента

БПЛА могут эффективно предоставлять услуги мобильным пользователям, обеспечивая кэширование контента и отслеживая их перемещение в соответствии с шаблоном движения [55]. Кэширование на базовых станциях стало одним из новых подходов к повышению пропускной способности и уменьшению задержки. Однако кэширование на фиксированной базовой станции наземной сети может оказаться неэффективным при обслуживании мобильных пользователей в случае частых переключений. Следовательно, для повышения эффективности кэширования необходимо разворачивать базовые станции, которые могут отслеживать мобильность пользователя для эффективной доставки требуемого контента, что и делается на основе БПЛА. На самом деле использование БПЛА с поддержкой кэширования является перспективным решением для выгрузки трафика в беспроводных сетях [56, 57]. В этом случае, используя информацию, ориентированную на пользователя, такую как распределение запросов контента и шаблоны мобильности, БПЛА с поддержкой кэширования можно близким к

оптимальному решению перемещать и развертывать для предоставления требуемых услуг пользователям. Еще одно ключевое преимущество развертывания БПЛА с поддержкой кэширования заключается в том, что сложность кэширования может быть значительно снижена по сравнению с обычным случаем фиксированной базовой станции наземной сети. Таким образом, развертывание БПЛА с возможностью кэширования может улучшить качество обслуживания (QoE) пользователей, минимизировать потребление энергии и уменьшить вероятность перегрузки в сети [58, 59].

1.6 Выводы

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. Не случайно, в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития сетей связи является создание интегрированной сети SAGSIN на этапе развертывания в будущем сетей связи шестого поколения. При этом в настоящее время можно выделить три основных преимущества интеграции наземных сетей связи пятого и последующих поколений и сетей связи воздушного базирования на основе БПЛА:

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.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

2.1 Введение

Беспрецедентный рост новых услуг и трафика в сетях связи, появление концепции виртуализации сети наряду с постоянно расширяющимся использованием мобильных устройств в современной сетевой среде показали основные проблемы традиционной архитектуры сетей связи. Традиционная сетевая архитектура сетей связи первого и второго десятилетий 21 века является достаточно статичной, поскольку изначально она была задумана для обслуживания вполне определенного типа трафика от вполне определенных групп пользователей, что делает эту архитектуру неэффективной для современных интерактивных и динамических мультимедийных потоков, генерируемых все более требовательными пользователями. Широкое же распространение Интернета Вещей (IoT) и, как следствие, самоорганизующихся сетей принципиально изменило требования к сетям связи. Кроме того, Тактильный Интернет также внес свою лепту в формирование новой архитектуры и требований к сетям связи. Действительно, задержка величиной в 1мс децентрализует сети связи и требует быстрой обработки информации на достаточно мощных для этого вычислительных ресурсах. Все это вызывает необходимость гибкого изменения возможностей сети и перераспределения ее ресурсов вплоть до перехода к микро сервисной архитектуре и миграции ресурсов. При этом все более важным становится использование для построения сетей связи программно-конфигурируемых сетей SDN (Software Defined Networks), которые органично

вписываются в системные решения по созданию и развитию сетей связи пятого и последующих поколений.

Программно-конфигурируемые сети (SDN) по сути своей предназначены для дифференциации сети на плоскость данных и плоскость управления, что позволяет не только оптимизировать расходы на построение сети, но и в условиях сверх плотных сетей и сетей связи с ультра малыми задержками обеспечить выполнение требований по параметрам качества обслуживания QoS и качества восприятия QoE [60]. чтобы гарантировать QoE пользователя.

Однако использование только одного контроллера SDN приводит к целому ряду проблем, связанному с излишней централизацией функций управления трафиком в едином контроллере. Проблемы могут возникать с гибкостью построения сети, балансировкой нагрузки, но самая главная проблема – характеристики надежности такой системы. Хорошо известно, что наиболее ненадежной структурой является радиальная, что и наблюдается при использовании одного контроллера. В связи с изложенным, в последние годы ведутся интенсивные исследования в области мульти контроллерных сетей the SDN [61]. Естественно, что такая структура ставит большое число новых задач, достаточно сложных с учетом необходимости распределения ресурсов между множеством контроллеров и множеством коммутаторов. Для решения таких задач используются мета эвристические методы, например, оптимизация структуры мульти контроллерной сети с использованием характеристик роя сальп.

2.2 Архитектура программно-конфигурируемых сетей

Программно-конфигурируемые сети SDN являются одной из базовых технологий, на которых строятся сети связи пятого и последующих поколений. Их использование позволяет рациональным образом построить систему управления трафиком на сети и уменьшить сетевые задержки. Применение SDN также дает возможность уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на сеть за счет оптимизации ее структуры и существенного увеличения гибкости сети для использования ее в решении практических задач. Изначально идеи о построении программно-конфигурируемых сетей были высказаны в университетах Стэнфорда и Беркли в 2006 году. С тех пор прошло достаточно много времени, основные решения по построению сетей SDN стандартизованы в МСЭ-Т, ONF, IETF, ETSI и т.д.

В соответствии с документами ONF программно-конфигурируемые сети являются адаптивной сетевой структурой с динамически изменяющимися возможностями. При этом уровень передачи данных отделен от уровня управления и, кроме того, уровень управления сетью является программируемым, а уровень приложений и услуг отделен от сетевой инфраструктуры [60, 61].

IETF, в свою очередь, рассматривает SDN как сеть, являющуюся основой для непосредственного управления сетями связи и их ресурсами с помощью собственных вычислительных ресурсов, программируемого управления и администрирования сетей на основе открытых интерфейсов, изолированных от сетевого уровня [62]. По сравнению с традиционным построением сетей SDN является лучше управляемой и более удобной для сетевых элементов, поскольку предоставляет лучшее управление от контроллеров.

Для лучшего понимания концепции построения программно-конфигурируемых сетей рассмотрим функциональные диаграммы

взаимодействия элементов сетей SDN. Функциональное представление сетей SDN может отображено тремя различными способами: распределением по уровням сетевой структуры, через интерфейсы сети и, наконец, посредством использования абстрактной архитектуры [60, 61].

1. Уровни SDN

Архитектура сети SDN представлена уровнем данных, уровнем управления и уровнем приложений, как это показано на Рисунке 2.1.

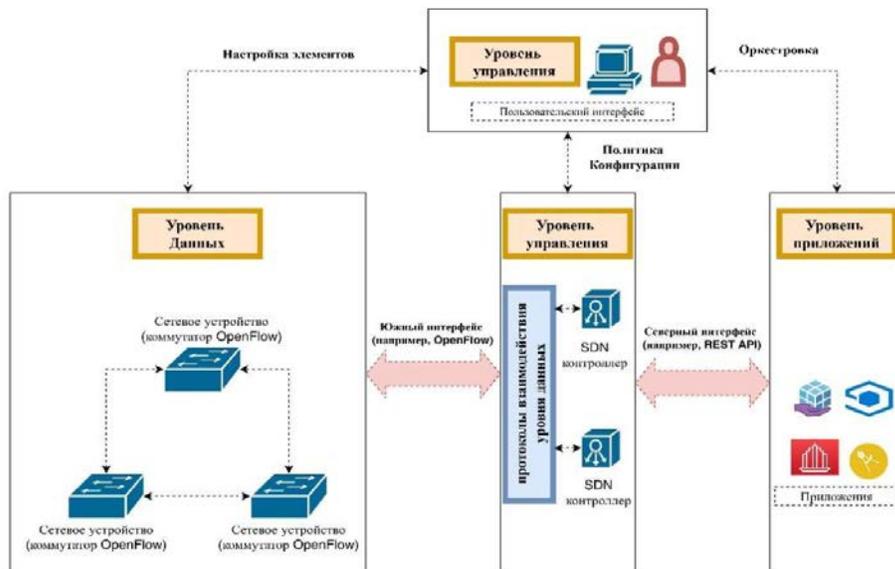


Рисунок 2.1 – Функциональная архитектура SDN [61]

Уровень приложений отвечает за предоставление услуг пользователям и контролирует функционирование сети. В задачи уровня услуг входит обеспечение мониторинга сети, оптимизация ее функционирования, сетевая безопасность, поддержание заданного уровня качества обслуживания QoS, Контроллеры SDN отвечают уровень управления сетью и его функционирование. При этом услуги и приложения обеспечиваются уровнем приложений на основе информации о трафике данных, обслуживаемом элементами сети SDN в соответствии требованиями по его передаче. devices when transmitting instructions and requirements.

Уровень управления должен управлять программно-конфигурируемой сетью, эффективно распределяя трафик и задачи по устройствам сети с учетом текущей нагрузки и отказов в сети. Целью этого уровня является также обеспечение надежности функционирования сети. Уровень управления также генерирует таблицы потоков, которые размещаются на устройствах сети и используются для передачи пакетов данных. Основные функции уровня управления выполняются контроллерами SDN. Контроллер отвечает также за все протоколы, необходимые для функционирования сети. Как уже отмечалось выше, уровень управления может быть распределен между несколькими контроллерами.

Уровень данных отвечает за передачу пакетов данных конечным пользователям, используя сетевые устройства – коммутаторы и маршрутизаторы. Передача данных осуществляется в соответствии с инструкциями уровня управления. Следует отметить, что при корректировке передачи данных через сеть сетевые устройства должны быть ответственны за перенаправление пакетов.

2. Интерфейсы SDN:

Технологии открытых сетей предусматривают для SDN два интерфейса контроллера: северный открытый интерфейс API и южный открытый интерфейс [60-62].

Южный интерфейс API обеспечивает соединение сетевых ресурсов и коммутаторов. Интерфейс позволяет обеспечить гибкое взаимодействие между контроллерами и коммутаторами, и маршрутизаторами уровня передачи данных сети, а также в необходимых случаях быструю реконфигурацию сети. Наиболее часто используемое семейство протоколов называется OpenFlow. Эти протоколы стандартизованы ONF и представляют основу для взаимодействия уровней передачи данных и управления. При передаче данных в программно-конфигурируемых сетях при использовании южного интерфейса коммутаторы обязаны поддерживать протокол OpenFlow. Следует отметить, что существует

много проприетарных решений помимо OpenFlow для взаимодействия уровня управления и уровня передачи данных на южном интерфейсе.

Северный интерфейс API обеспечивает взаимодействие между уровнем управления и уровнем приложений сети SDN. На северном интерфейсе осуществляется логика бизнес решений в соответствии с инструкциями сети. Бизнес приложения передают данные контроллеру, который может их использовать для перепрограммирования сети. Кроме того, используя северный интерфейс, приложения и услуги обеспечиваются информацией о передаче данных или маршрутизации от уровня управления или уровня передачи данных.

3. Абстрактная архитектура SDN:

Используя абстрактную модель разделения уровней в архитектуре сети SDN, можно получить не только гибкую архитектуру и различные приложения, но и увеличить эффективность построения сети в целом. Абстрактная архитектура SDN может быть поделена на два уровня абстракции:

a. Абстрактный уровень устройств и ресурсов DAL (Device and Resource Abstraction Layer). Этот уровень позволяет отделить уровень передачи данных от уровня управления и мониторинга. Кроме того, абстрактный уровень DAL позволяет стандартизовать интерфейсы.

b. Абстрактный уровень услуг SAL (Service Abstraction Layer). Этот уровень применяется для:

- абстрактного представления конфигурации уровня передачи данных в соответствии с правилами передачи пакетов,
- представления архитектуры сети в виде графа representation,
- обеспечения возможности для уровня управления по сбору информации о текущем состоянии сети.

2.3 Программно-конфигурируемые сети с одним контроллером

SDN с единственным контроллером представляет собой централизованный вариант построения программно-конфигурируемой сети, который теоретически является самым простым. Такая сеть SDN с одним контроллером показана на Рисунке 2.2. Однако система с простым контроллером достаточно плохо масштабируема и не может эффективно поддерживать развитие сети.

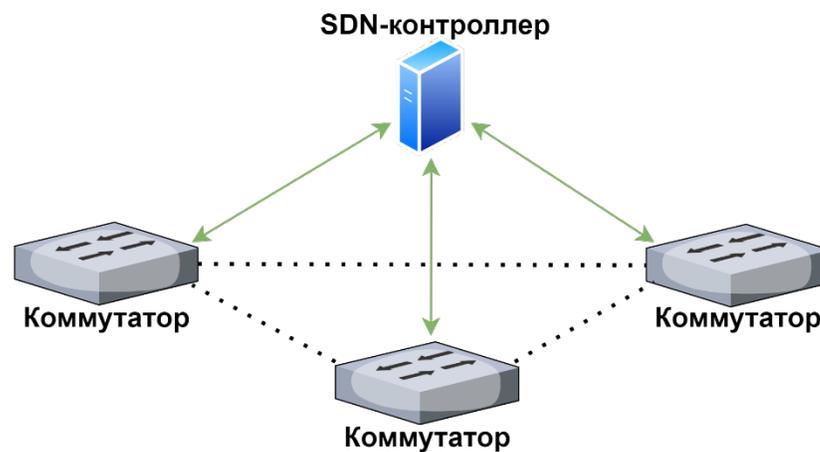


Рисунок 2.2 – SDN с одним контроллером

В настоящее время существует несколько подходов к реализации программно-конфигурируемой сети с одним контроллером. В [63] предложены решения для реализации такой системы в рамках работ по созданию сетей связи пятого поколения, в том числе для транспортной сети. Авторы предлагают структуру сети, построенную на базе SDN с использованием граничных вычислений. В [64] предложено использовать сетевое кодирование вместе с SDN для уменьшения задержки в сетях связи пятого поколения. Сетевое кодирование осуществляется в программном маршрутизаторе, который выполняет функции виртуальной сети. Предложенное решение анонсируется как решение для сетей связи пятого поколения и Интернета Вещей.

В [65] авторы представляют программную соту для сетей связи, для которой предполагается, что оператор сети имеет высокий уровень достижений в предоставлении услуг пользователям. Предложенная система уменьшает размеры таблиц маршрутизации и комбинирует трафик для нескольких заранее определенных коммутаторов в сети. Система использует доступ коммутаторов к базовым станциям, которые представляются как программные коммутаторы. Коммутаторы доступа могут классифицировать пакеты услуг для базовых станций, например, по требуемой пропускной способности. Приложения технологии SoftCell используют компоненты традиционных сотовых сетей. Эволюционирующее пакетное ядро сети представляет для контроллера ядро сети со специальными функциями. Кроме того, поскольку контроллеры устанавливают правила для коммутаторов и сигнализации также используются и возможности ядра. Технология основана на возможностях существующих сетей длительной эволюции LTE. Это решение является весьма гибким и масштабируемым для мобильных сетей систем длительной эволюции. Основная проблема предложенного решения состоит в производительности сетевого контроллера и в обеспечении защиты шлюзов SGW, PGW в ядре сети.

В [66] оптимизируется структура виртуальной сети с целью уменьшения задержки из конца в конец для мобильных сетей LTE-A. Централизованный контроллер располагается в центре сети и используется для распределения физических ресурсов. Авторы используют алгоритм виртуальных сетей VNE (Virtual Network Embedding) для распределения ресурсов виртуальной сети по подсетям. Системная модель включает в себя пограничные маршрутизаторы и простые шлюзы. Пограничные маршрутизаторы отвечают за мобильный менеджмент, базируясь на концепции распределенного мобильного менеджмента DMM (Distributed Mobility Management). Предложенное решение позволяет оптимизировать маршрутизацию и использование виртуальной сети. Система обеспечивает лучшие значения для задержки, в то же время, характеристики

мобильности пользователя также улучшаются. К сожалению, возможности мобильных граничных вычислений MEC не используются, а предложенная система может быть применима только для систем длительной эволюции LTE-A.

В [67] предложена архитектура сети связи пятого поколения на основе использования программно-конфигурируемых сетей для сетей с плотным расположением узлов. Авторы предлагают при этом размещать контроллеры в ядре сети. При этом другой важной функцией контроллеров является распределение радио ресурсов на сети и решение проблем гетерогенности сети – использования множества технологий в радио части. Предложенная система, в основном, уменьшает задержку, что, естественно, очень важно в условиях предстоящего повсеместного внедрения сетей связи с ультра малыми задержками. Контроллер использует три программируемых интерфейса, которые обеспечивают прогнозирование возможного перемещения пользователя относительно системы и, таким образом, способствуют уменьшению времени, затрачиваемого на хэндовер. Каждая из перечисленных выше работ посвящена исследованию применения централизованного контроллера в ядре сети. Все предложенные системы при этом обеспечивают увеличение эффективности сети по скорости и задержкам.

2.4 Программно-конфигурируемые сети с несколькими контроллерами

В мульти контроллерной SDN сети число контроллеров зависит от масштаба сети и поступающего на нее трафика. При этом основной проблемой для мульти контроллерной сети является требуемое число контроллеров и их распределение по сети. Эта проблема известна как проблема размещения ресурсов контроллеров

[68]. Задача размещения контроллеров по сети имеет своей целью уменьшение задержек, повышение энергетической эффективности, балансировку нагрузки и улучшение надежности сети [69]. Заметим, что капитальные и эксплуатационные затраты (CAPEX и OPEX) для сети также с существенной степенью зависят от требуемого числа контроллеров [70]. Таким образом, определение оптимального числа контроллеров и оценка их наилучшего распределения по сети является важнейшей задачей при планировании мульти контроллерных программно-конфигурируемых сетей. Важно также отметить, что и число контроллеров, и их распределение по сети может динамически изменяться в зависимости от изменений в размере сети и в объеме поступающего трафика.

Динамическое изменение в объеме поступающего трафика может привести, естественно, к изменению числа контроллеров, вовлеченных в процесс обслуживания трафика. Когда трафик растет, новые контроллеры могут быть активированы, а когда трафик уменьшается, определенное число контроллеров может быть деактивировано. Частота изменения трафика является сопутствующим процессом в активации и деактивации контроллеров для обслуживания SDN сети. Спящие контроллеры могут рассматриваться как альтернативная опция для процесса активации и деактивации контроллеров [71]. Решение об использовании того или иного из спящих контроллеров об использовании для улучшения характеристик обслуживания может быть принято, в том числе, на основе экспериментальных оценок.

Проблема размещения контроллеров по сети и распределения ресурсов по ним имеет очень большое значение для эффективного функционирования SDN сетей. Этим вопросам посвящено множество исследований в области распределения ресурсов в программно-конфигурируемых сетях.

Физическое и логическое распределение ресурсов в сетях SDN может рассматриваться как для неиерархического распределения контроллеров, так и в иерархическом случае. При неиерархическом распределении контроллеров

каждый контроллер является головным для какой-то части сети, и контроллеры кооперируют свои ресурсы, основываясь на некотором заранее предусмотренном механизме.

А. Неиерархическое распределение контроллеров SDN:

Неиерархическая структура мульти контроллерной сети SDN приведена на Рисунке 2.3, при этом каждый контроллер управляет подсетью или доменом общей сет. Несколько контроллеров, объединенных в такую сеть, позволяют уменьшить задержку в сети и улучшить ее надежность. Существует две стратегии для распределенной архитектуры мульти контроллерной сети. Локальная стратегия предполагает, что каждый контроллер имеет свою собственную локальную сеть, а каждая близлежащая локальная сеть абстрагируется как логический узел. Глобальная стратегия предполагает, что каждый контроллер является частью общей сети. В обоих случаях контроллеры нуждаются во взаимодействии по каналам контроллер-контроллер для обеспечения необходимой информацией о состоянии соседних доменов.

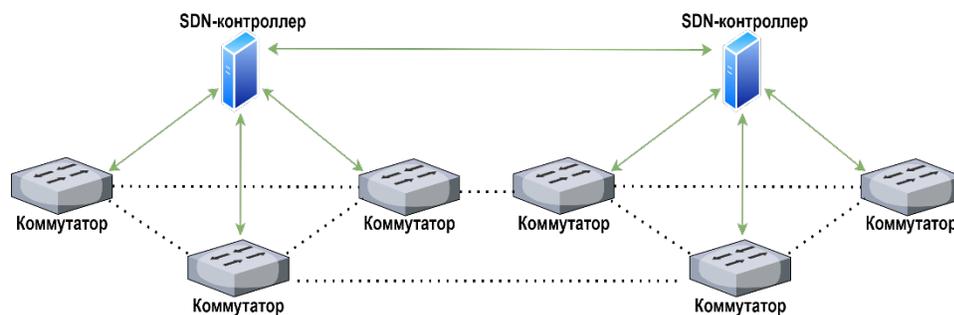


Рисунок 2.3 – Неиерархическая мульти контроллерная сеть SDN

Протокол HyperFlow [72] является логическим продолжением движения от централизованной архитектуры к распределенной и продолжением протокола is OpenFlow. В HyperFlow авторы используют локальные контроллеры, обслуживающие требования в своей собственной зоне. Это реально реализовано в системе, известной как NOX [73] приложение, которое ответственно за:

(a) глобальную сетевую синхронизацию между контроллерами, (b) взаимодействие с коммутаторами, управляемыми другими контроллерами, и (c) управление ответами, приходящими от других элементов сети к оригинальному контроллеру. Система, называемая «публикация/подписка», являющаяся классической системой с ожиданием, используется для выполнения этих задач через контроллеры с разных сайтов. В [74] авторы предлагают новую распределенную сетевую платформу под названием «Onix» для крупномасштабных сетей с учетом существующих проблем, таких как, например, обеспечение согласованного распределения ресурсов по сети, глобальное представление сети в целом среди сетевых приложений, механизмы восстановления после отказа и т.п. в системах управления сетями. Элементы Onix передают состояние сети другим элементам, чтобы иметь возможность масштабировать сети как можно в большей степени. Авторы придерживаются следующих подходов к улучшению масштабируемости сети: (1) распределение сетевой информационной базы (NIB) по контроллерам, (2) агрегация кластеров для иерархической структуры и (3) совместимость и устойчивость состояний сети для приложений. Подобная система Software Transactional Networking (STN) [75] также предлагает обеспечить взаимодействие плоскости распределенного управления с использованием межуровневого программного продукта для согласованности политики обслуживания трафика между распределенным контроллером и плоскостью данных. В то время как система Onix ожидает, что разработчики приложений предоставят необходимую логику для обнаружения и разрешения конфликтов состояния сети из-за параллельного управления несколькими контроллерами, система STN предлагает механизмы использования согласованных параллельных политик для различных контроллеров. Тамм и др. в [76] изучают возможность использования нескольких контроллеров для улучшения масштабируемости без наличия представлений о глобальной сети и ограниченной информации о топологии сети, которая находится в контроллерах.

При этом используется методика маршрутизации потока, чтобы увидеть целесообразность использования того или иного контроллера, и два подхода для реализации: путь-часть пути и часть пути-путь для взаимодействия. В [77] авторы предлагают распределенную архитектуру контроллеров на основе кластеризации и структуру для обеспечения взаимодействия между контроллерами в случае масштабирования сети. Эта кластерная архитектура обеспечивает гибкость сети при добавлении или удалении контроллеров, поскольку она не требует использования при этом сетевых приложений. Контроллеры выбирают головной контроллер, который отвечает за разграничение задач между контроллерами, а также между контроллерами и коммутаторами. Архитектуры распределенных контроллеров предлагаются для решения проблем масштабируемости сетей SDN. Однако любая архитектура распределенных контроллеров может не обеспечить требуемую масштабируемость сети из-за отсутствия балансировки нагрузки на контроллеры. Система ElastiCon [78] позволяет равномерно распределять нагрузку по контроллерам на основе создаваемого пула контроллеров. Эта система динамически распределяет нагрузку между контроллерами, добавляя или удаляя контроллеры из пула контроллеров и/или перераспределяя нагрузку на отдельные контроллеры на основе пороговых значений нагрузки. Фемиус и др. в [79] предложили структуру распределенной плоскости управления SDN «DISCO» (Distributed SDN Control plane), состоящую из нескольких контроллеров, управляющих различными доменами SDN, которые совместно используют агрегированную общесетевую информацию для совместимого представления сети на каждом из контроллеров. Структура DISCO состоит из двух основных частей. Внутри доменная часть отвечает за функции собственного домена контроллера, а междоменная часть управляет потоками в распределенных сетях путем обмена агрегированной информацией о состоянии сети, такой как резервирование, топология и т.д. Отличие платформы DISCO от других распределенных архитектур заключается в ее способности разделять внутри доменную и

междоменную информацию наряду с разнородными междоменными соединениями, такими как, например, туннели MPLS и соединения SATCOM. Бари и др. [80] предлагают решения по развертыванию нескольких распределенных контроллеров в крупномасштабной глобальной сети. Рассматривается архитектура, в которой предусмотрена возможность корректировки взаимодействия активных контроллеров с присоединенными коммутаторами в соответствии с текущей динамикой сети с тем, чтобы сократить время настройки потока сообщений, горизонтальные издержки по времени между контроллерами и вертикальные издержки по времени между контроллерами и коммутаторами. В предложенной архитектуре существует возможность назначения коммутаторов для обслуживания конкретным контроллерам в определенные моменты времени.

Б. Иерархическое распределение контроллеров SDN:

Иерархическая архитектура SDN приведена на Рисунке 2.4 в предположении, что уровень управления в вертикальном плане является многоуровневым в зависимости от требуемых услуг. В соответствии с [81] иерархическая организация уровня управления может улучшить масштабируемость и производительность SDN. Для улучшения масштабируемости авторы в [82] предлагают иерархическую двухуровневую структуру управления, которая разделяет функции управления на локальные и глобальные. Там же предлагается уменьшить общую нагрузку на плоскость управления без необходимости модификации коммутаторов OpenFlow. При этом в двухуровневой иерархической плоскости управления частые события, происходящие на плоскости передачи данных, обрабатываются нижним уровнем иерархии (локальные контроллеры без межсетевого взаимодействия, обеспечивающие выполнение локальных приложений), а сетевые события, требующие общесетевого представления, обрабатываются верхним уровнем

иерархии (логически централизованный контроллер, выполняющий сетевые приложения и управляющий локальными контроллерами).

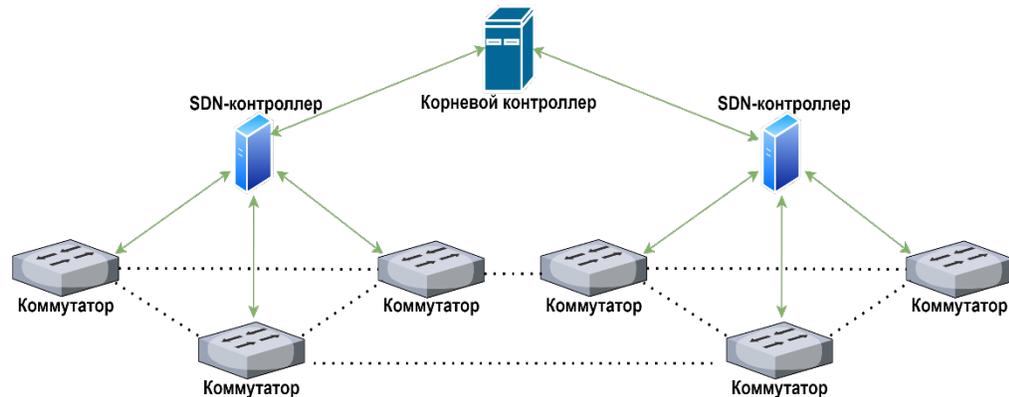


Рисунок 2.4 – Иерархическая мульти контроллерная сеть SDN

В [83] предложено системное решение известное как «Logical xBar». Последний является модулем, используемым для построения централизованной абстрактной иерархической плоскости управления. При этом плоскость управления состоит из двух модулей: 1) Собственно Logical xBar, который является программируемым объектом и может перенаправлять пакеты между портами и 2) Logical Server, который управляет таблицей маршрутизации, а также обеспечивает вычисления на плоскости управления. В предложенной архитектуре сама сеть не обязательно должна быть физически иерархической, вместо этого агрегация логических xBar и логических серверов создает абстрактную иерархию в сети.

Естественно, что и неиерархические, и иерархические структуры уровня управления имеют определенные проблемы. В неиерархической архитектуре плоскости управления контроллеры могут столкнуться с проблемой возрастающей вычислительной сложностью в результате масштабирования сети. С другой стороны, иерархические архитектуры имеют проблему больших расстояний между элементами сети [81]. В [84] авторы предлагают систему «Орион», иерархическую плоскость управления для крупномасштабных сетей, управляемых в то же время одним и тем же администратором, чтобы облегчить

вышеупомянутые две проблемы. Орион имеет три слоя: нижний слой состоит из сетевых устройств, средний уровень состоит из зональных контроллеров, а верхний уровень содержит контроллеры доменов. Контроллеры доменов имеют глобальные сетевые представления для своих доменов и синхронизируют эту информацию друг с другом по распределенному протоколу. В [85] авторы представляют децентрализованную сеть Decentralize-SDN (D-SDN), архитектурное решение, которое распределяет плоскость управления не только физически, но и логически. D-SDN использует иерархию контроллеров, в которой основные контроллеры (верхний уровень) делегируют управление вторичным контроллерам (нижний уровень) для управления определенными сетевыми устройствами. В [86] предлагается архитектура «FlowBroker» для лучшего взаимодействия между несколькими доменами с точки зрения балансировки нагрузки и производительности сети. Архитектура FlowBroker использует идею иерархии с контроллерами доменов и одним или несколькими суперконтроллерами, называемых брокерами, расположенных на уровне поверх них. Каждый контроллер домена может подключаться к нескольким брокерам в соответствии с их характеристиками, которые включают производительность брокера в отношении балансировки нагрузки и надежности. В [87] предложена сетевая архитектура на основе иерархии, а также подход к маршрутизации с гарантированным уровнем качества обслуживания QoS. Авторы используют идею уровней, на одном из которых расположены контроллеры сетей. Существует также основной контроллер, который работает как брокер поверх сетей, чтобы обеспечивать устойчивость сети в целом. Экспериментальные результаты показывают, что сетевой контроллер в иерархической среде обрабатывает на 50 % меньше трафика, чем сетевой контроллер в неиерархической среде.

2.5 Программно-конфигурируемые сети и БПЛА

Сети беспилотных летательных аппаратов на основе SDN в последнее время привлекают все большее внимание исследователей во всем мире [88]. Архитектура SDN может обеспечить гибкое управление сетями БПЛА [89]. Развертывание технологии SDN в сетях БПЛА позволяет последним эффективно выполнять задачи в установленные сроки. В этом разделе рассмотрим различные архитектурные решения на основе SDN, известные из литературы по сетям БПЛА.

Рамапрасат и др. [90] предложили систему на основе SDN для управления связью между БПЛА. Основная цель этой системы — улучшить использование сетевых ресурсов, уменьшить задержку и увеличить пропускную способность сети БПЛА. Контроллер SDN играет роль централизованного управляющего устройства, которое обеспечивает хранение, обработку и необходимое управление в сети. Приоритеты пакетов контролируются в соответствии с различными уровнями приоритета для поддержания устойчивости сети. Пакеты могут проходить через серию переключателей, которые отслеживаются и управляются контроллером SDN с использованием плоскости управления для достижения пакетом приемника или контроллера SDN. В последнем случае для завершения процесса передачи пакетов, контроллер SDN ретранслирует их адресату.

Кью и др. в работе [91] предложили алгоритм централизованной дифференциальной маршрутизации трафика (TDR) на основе двух разных контроллеров: (i) контроллера координации и (ii) контроллера кластера SDN. TDR направлен на обеспечение требуемого уровня качества обслуживания QoS и характеристик надежности для соединений, чувствительных к задержкам. Как правило, БПЛА организованы в виде нескольких кластеров. В каждом кластере контроллер SDN кластера управляет передачей данных, планированием сетевых ресурсов и взаимодействием со всеми БПЛА в кластере. На следующем уровне

расположен привязной дирижабль, который контролирует все области, в которых все БПЛА должны знать свое положение и скорость. Для прогноза доступности канала предполагается, что максимальная дальность связи всех БПЛА и их соответствующее местоположение заранее известны.

Новое решение для маршрутизации пакетов предложено в [92] на основе гибридной технологии SDN, развернутой среди группы БПЛА и устройств IoT. Некоторые БПЛА могут принадлежать сети SDN и учитывать правила переадресации SDN в соответствии с топологией сети. У этих БПЛА также есть возможность перехода с SDN на распределенный традиционный протокол маршрутизации.

Сечинти и др. в работе [93] предложили структуру многопутевой маршрутизации на основе SDN для сетей БПЛА. Контроллер SDN используется поверх этой структуры, чтобы избежать перекрытия маршрутов. БПЛА, в свою очередь, работают как программные коммутаторы и могут выполнять команды по передаче данных в соответствии с директивами контроллера. Многослойная графовая модель используется для представления многопутевой маршрутизации в трехмерном пространстве с целью обеспечения устойчивости сети.

Юань и др. в работе [94] предложили архитектуру сети мобильных датчиков на основе SDN для надежной передачи данных в роях БПЛА. Целью этой архитектуры является преодоление ограничений сетей БПЛА, таких как вычислительные проблемы и ограниченное распределение ресурсов канала. Централизованный сервер SDN предоставляет операторам и поставщикам услуг БПЛА возможности управления сетью для крупномасштабного управления роями БПЛА с целью поддержания топологии глобального роя, При этом каждый БПЛА отслеживает условия связи, а также скорость полета своих соседних БПЛА. Затем эта информация отправляется на сервер SDN для управления изменениями топологии и планирования сетевых ресурсов. Эти процессы значительно снижают нагрузку от БПЛА.

Кубал и др. в работе [95] разработали архитектуру на основе SDN для сетей БПЛА как для прогнозирования сетевых сбоев, так и для обеспечения максимальной доступности сети. При этом централизованный контроллер может предсказывать будущие позиции БПЛА. Это позволяет в предложенной архитектуре переключать радиоканалы и изменять маршруты потоков заранее и до каких-либо сбоев в сети. Отметим, что использование предиктивной SDN максимально увеличивает доступность сети.

Киричек Р.В. и др. в работе [96] предложили архитектуру на основе SDN для летающей всепроникающей сенсорной сети (FUSN), в которой БПЛА развертываются в качестве программных коммутаторов и контроллеров. Цель этой архитектуры — наладить эффективный сбор данных с помощью БПЛА с мобильных датчиков, расположенных на земле (т. е. с наземных сегментов или сенсорных полей). В этой работе сделан вывод о том, что принятая архитектура SDN сводит к минимуму объем маршрутизируемого трафика и повышает его устойчивость к изменениям топологии. В статье [97] предлагается, чтобы сеть могла быть сформирована путем установки плоскости данных или коммутаторов OpenFlow на БПЛА и средств управления на централизованном наземном контроллере.

2.6 Выводы

Во второй главе 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 использованию SDN в 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.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПЯТОГО И ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ

3.1 Введение

Опережающее развитие новых телекоммуникационных технологий привело к существенным изменениям в сетях и системах связи, что способствовало значительному увеличению объема трафика. При этом доминирующие сегодня сценарии, ориентированные на человека как пользователя сети, будут дополнены огромным числом общающихся между собой и с человеком машин. Сосуществование человеко-ориентированных и машинных приложений приведет к большому разнообразию сетевых услуг [98]. Технология 5G уже поддерживает такие ресурсоемкие услуги, как массивная межмашинная связь, сверхнадежная связь и связь с ультрамалой задержкой, которые требуют высокой скорости передачи данных, низкой задержки в единицы миллисекунд, а также подключения миллионов устройств на квадратный километр [99]. В то же время надо обеспечить высокий уровень качества обслуживания (QoS), что играет важную роль в технологии 5G. Интернет вещей (IoT) представляет собой межмашинное (M2M) взаимодействие, которое требует связи с малой задержкой и может соединить миллиарды датчиков, а также расширить понимание для сенсорного восприятия в разнородных средах.

Развитие IoT – чрезвычайно важный шаг, затрагивающий практически все сферы человеческой деятельности. Распространение IoT будет способствовать доступности все большего количества информации, развитию аналитических возможностей, принятию решений и действий на основе результатов сети.

Еще одна технология, требующая ультрамалых задержек и высокого QoS, – это тактильный интернет (ТИ), созданный на идее удаленного управления роботами аватарами, роботами манипуляторами и т.п. в режиме реального времени [100]. ТИ будет использовать традиционный проводной интернет, мобильный интернет и IoT в качестве сквозной транспортной инфраструктуры. Кроме того, можно предсказать, что ТИ открывает новую перспективу для взаимодействия человека с машиной благодаря ультрамалой задержке при построении кооперативных систем в реальном времени [101].

Третьей важной технологией, широкомасштабное внедрение которой намечено в сетях 5G, является дополненная реальность (AR), также требующая связи с ультрамалой задержкой и используемая во многих приложениях: управление роботами, беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), медицина, техническое обслуживание и ремонт сложного оборудования, игровая и развлекательная индустрия, управление и мониторинг в сетях связи [102-103]. Требование доставки данных между большим числом устройств, значительно превышающих число абонентов существующих сетей связи, ставит задачу обеспечения доступности, QoS, надежности и стабильности работы сетей связи в таких условиях.

Трафик, создаваемый устройствами IoT, может обслуживаться и собираться вместе с трафиком других коммуникационных услуг. На самом деле характер трафика IoT в целом отличается от трафика других услуг, что требует его исследований и оценки влияния на QoS [104]. В [105] представлено исследование моделей межмашинного трафика (M2M) и введено определение типов потоков трафика для массовых событий. Кроме того, в [106] приведена модель обслуживания и шаблон трафика для дополненной реальности, объединенные с концепцией IoT, и разработан метод оценки QoS. Кроме того, в [107] предложена система очередей (QS) в качестве модели для оценки QoS при совместном использовании технологий IT и IoT.

В данной работе предложена комплексная аналитическая модель для потоков трафика IT, AR и IoT для оценки QoS по параметрам вероятности потери 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.

3.2 Анализ концепций Интернета Вещей, Тактильного Интернета и дополненной реальности

В этом разделе будут рассмотрены концепции используемых в модели технологий. В разделе 3.2.1 – анализ концепции Интернета Вещей, Тактильный Интернет – в разделе 3.2.2, в разделе 3.2.3 – дополненная реальность.

3.2.1 Концепция Интернета Вещей

Концепция Интернета вещей, разработанная Сектором Стандартизации Телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) в начале

второго десятилетия XXI века, представляет собой концептуальный взгляд на использование вещей в качестве одноранговых терминалов сетей связи [111]. Сама идея Интернета вещей очень проста. Представим, что все окружающие нас предметы и устройства (бытовая техника и посуда, продукты, автомобили, промышленное оборудование и т.д.) снабжены миниатюрными сенсорными (чувствительными) устройствами, а также имеют адрес в сети связи общего пользования. При наличии необходимых каналов связи с ними возможно не только отслеживать эти объекты и их параметры в пространстве и времени, но и управлять ими, а также включать информацию о них в общую «умную планету». В самом общем виде, с инфокоммуникационной точки зрения, Интернет вещей можно записать в виде следующей символической формулы:

$$\text{Интернет вещей} = \text{датчики} + \text{данные} + \text{сети} + \text{услуги}$$

В более узком смысле слова Интернет вещей — это глобальная сеть компьютеров, датчиков и исполнительных механизмов, которые общаются друг с другом с помощью интернет протокола IP (Internet Protocol) или других протоколов [112, 113]. Отметим, что вследствие необходимости малого энергопотребления для связи между Интернет вещами могут использоваться и протоколы типа ZigBee, например, в рамках одного и того же сенсорного поля.

Концепция IoT играет решающую роль в дальнейшем развитии инфокоммуникационной отрасли. Это подтверждается и позицией Международного союза электросвязи (МСЭ). И хотя на международном уровне эта концепция уже приобретает черты устоявшейся технологии, для нее по-прежнему проводится активная работа в области стандартизации архитектуры, технических компонентов, приложений, тестирования [114].

Сети IoT состоят из миллионов и миллиардов недорогих датчиков с низким энергопотреблением, низкой вычислительной мощностью и небольшим объемом памяти.

В качестве технологических решений при реализации концепции Интернета Вещей получили широкое распространение методы радиочастотной идентификации RFID (Radio Frequency Identification), беспроводные сенсорные сети WSN (Wireless Sensor Network), связь ближнего действия NFC (Near Field Communication) и межмашинная связь M2M (Machine-to-Machine) [115-123]. Технология межмашинного взаимодействия представляет собой взаимодействие беспроводных и проводных систем и устройств без вмешательства пользователя. Число таких устройств по прогнозам будет значительно увеличиваться, в результате чего на сети и системы связи трафик IoT может оказать существенное влияние. Этот трафик представляет собой поток сообщений в виде пакетов, так как сеть межмашинной связи, в основном, использует метод коммутации пакетов [109, 110].

Интернет вещей основан на трех основных принципах. Во-первых, это всепроникающая инфокоммуникационная инфраструктура; во-вторых, осуществляется глобальная идентификация каждого объекта; и в-третьих, существует возможность для каждого объекта отправлять и получать данные через Интернет или иную сеть, к которым он подключен. В общем виде под Интернетом вещей понимается совокупность различных устройств, датчиков, объединенных в сеть по любым доступным каналам связи, использующим различные протоколы взаимодействия друг с другом и общий протокол IP для выхода в глобальную сеть.

Применение концепции Интернета вещей для передачи тактильных ощущений, в том числе для робототехнических систем, потребовало принципиально иных задержек при предоставлении услуг, а именно 1мс вместо существующих 100мс [124, 125]. Эти тактильные услуги сформировали еще одну

новую концепцию – Тактильный Интернет, которая будет подробно обсуждаться в следующем разделе.

3.2.2 Концепция Тактильного Интернета

Тактильный Интернет впервые был определен МСЭ-Т как сетевая архитектура, сочетающая ультра малую задержку с чрезвычайно высокой доступностью, надежностью и безопасностью. Как следует из названия, Тактильный Интернет направлен на передачу в реальном времени тактильных ощущений [132]. В настоящее время уже понятно, что Тактильный Интернет позволит предоставить широкий спектр новых приложений, которые существенно расширят перечень услуг, предлагаемый сегодняшними сетями. Интерактивные тактильные приложения в реальном времени будут составлять основную часть этих приложений, и они будут играть ключевую роль в улучшении повседневной жизни. Дистанционно управляемые системы могут стать ключевыми для функционирования нескольких очень важных областей деятельности человека, таких как здравоохранение (например, теледиагностика, телехирургия), промышленность (например, опасные и труднодоступные среды), виртуальная и дополненная реальность (например, система обучения пожарных), дорожное движение (например, автоматизированное или совместное вождение), образование и многие другие [130, 131]. Тактильные приложения предъявляют ряд строгих требований к задержке и надежности. Тактильный Интернет требует ультра малой задержки, поскольку он должен обеспечивать обратную связь в реальном времени и контроль над физическими объектами [133]. Это означает, что время между

отправкой пользователем ввода и получением обратной связи должно быть, как можно меньше. Для этого задержка должна быть величиной в 1 мс и менее.

3.2.3 Концепция дополненной реальности

Дополненная реальность (AR) определяется как интерактивный опыт в реальной среде, в которой объекты, находящиеся в реальном мире, дополняются виртуальной информацией, такой как текст, изображения, анимация, трехмерные модели в режиме реального времени [126-129]. Ее также можно описать как состояние, при котором контекст реального мира динамически накладывается на виртуальную информацию в заданное время в заданном местоположении. В этом смысле AR позволяет пользователям пребывать в иммерсивной среде, объединяющей реальный и виртуальный миры.

Целью предоставления услуг дополненной реальности является обеспечение расширенных возможностей взаимодействия с сетью, которые могут удовлетворить потребности людей и сделать их жизнь лучше. Услуги дополненной реальности (AR) расширяют возможности пользователя по восприятию и взаимодействию с физическим миром. С другой стороны, технология виртуальной реальности (VR) или виртуальная среда [134] полностью погружает пользователей в виртуальный мир, не позволяя им видеть реальный мир, в отличие от технологии AR, которая усиливает ощущение реализма за счет наложение виртуальных объектов и информации в режиме реального времени на реальный мир. Кроме того, наиболее существенное различие между VR и AR заключается в том, что AR не ограничивается конкретным типом технологии отображения. Более того, дополненная реальность способна улучшить все

чувства, включая обоняние, осязание и слух. Услуги AR можно использовать для улучшения или замены отсутствующих чувств пользователей посредством сенсорной замены, используя, например, звуковые сигналы для улучшения зрения слепых пользователей или используя визуальные сигналы для улучшения слуха глухих пользователей. По задержке сети с предоставлением услуг дополненной реальности относятся к сетям связи с ультра малыми задержками – в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т значение задержки не должно превышать 5мс.

3.3. Анализ моделей трафика

3.3.1 Модели трафика для традиционных услуг сетей связи

Традиционные модели трафика в сети связи общего пользования можно проанализировать путем изучения типов используемых услуг, объема трафика, генерируемого каждой услугой и времени суток, когда трафик является максимальным.

Типы услуг. Типы услуг, используемых в сети связи общего пользования, могут различаться в зависимости от их предназначения. Широко известные услуги включают в себя просмотр веб-страниц, электронную почту, обмен файлами, потоковое мультимедиа, VoIP (голос поверх IP) и видеоконференции.

Объем трафика. Объем трафика, генерируемого каждой услугой, можно определить путем измерения числа байтов, отправленных и полученных за определенный период. Эти данные можно использовать для определения того, какие услуги генерируют больше всего трафика, а какие меньше.

Время суток. Время суток, когда трафик является самым высоким, также можно определить путем измерения числа байтов, отправленных и полученных в разное время в течение дня. Эти данные могут помочь определить периоды пикового использования для определенных услуг или использования сети в целом. Это также может помочь определить любые потенциальные проблемные места в сети, которые, возможно, потребуется модифицировать.

Поток запросов (поток трафика) — это последовательность запросов, которые выполняет пользователь при взаимодействии с сайтом или приложением. Поток запросов начинается, когда пользователь делает запрос на сервер, который затем обрабатывает запрос и отправляет ответ. Ответом может быть HTML-страница, изображение или другие данные. Затем пользователь изучает ответ, что может инициировать дополнительные запросы и ответы до тех пор, пока задача пользователя не будет решена в соответствии с требованиями по качеству обслуживания.

Основной задачей моделирования трафика в сетях связи является имитация поведения сетевого трафика и прогнозирование производительности сети в различных условиях. Это включает в себя анализ влияния различных факторов, таких как пользовательский спрос, топология сети, характеристики трафика и их влияние на производительность сети. Модели трафика также можно использовать для оценки различных вариантов планирования сети, выявления потенциальных проблемных участков или элементов сети и оптимизации ее производительности.

Поток запросов может быть, как случайным, так и детерминированным. Случайные потоки трафика могут поступать из любого источника в любое время. С другой стороны, детерминированные потоки трафика являются регулярными и предсказуемыми, поступающими из определенного источника через заранее определенные интервалы времени.

Функция распределения $F(t)$ временных интервалов между запросами представляет поток трафика или может быть задана функцией распределения

числа запросов за интервал времени. Поток трафика может быть, как однородным, так и неоднородным. Однородные потоки трафика — это потоки, идентичные по своей природе и имеющие одинаковый тип данных или информации. Гетерогенные потоки трафика — это те, которые различаются по своей природе и имеют разные типы данных или информации.

Одним из наиболее известных потоков трафика является простейший поток, для которого характерны следующие свойства:

1) стационарный – поток называется стационарным, если вероятность получения определенного количества запросов за какой-либо промежуток времени определяется только длительностью этого интервала и не зависит от момента его начала;

2) ординарность – обычный поток – это поток, в котором вероятность получения более одного запроса за короткий промежуток времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью получения одного запроса;

3) без последствия - поток запросов называется потоком без последствия, если вероятность поступления запросов в момент времени t не зависит от предыдущих событий.

Поток, обладающий свойствами ординарности и отсутствия последствия, называется потоком Пуассона. Этот поток не является стационарным.

Поток, обладающий свойствами стационарности и отсутствия последствия, называется групповым пуассоновским потоком.

Самая распространенная, полезная и простая модель — это модель простейшего потока. Его главная особенность заключается в том, что число запросов, поступающих за определенный интервал, является случайной величиной, подчиняющейся распределению Пуассона. Временные интервалы между запросами являются случайными и подчиняются экспоненциальному распределению.

Для описания трафика, генерируемого множеством независимых источников запросов, обычно используется простейшая модель потока. Например, трафик в сетях с коммутацией каналов. В сетях с коммутацией пакетов свойства потоков не всегда описываются свойствами простейшего потока. Исследования трафика показали, что эти потоки часто обладают свойствами фрактальных процессов. Для этого вводятся дополнительные характеристики, такие как параметр Херста. На основании значений параметра Херста потоки классифицируются как антиперсистентные или самоподобные.

Самоподобие обычно наблюдается в интернет-трафике, где количество отправляемых и получаемых данных относительно сохраняется с постоянной скоростью во времени. Этот тип трафика может быть полезен в сетях, поскольку он обеспечивает эффективное использование полосы пропускания и снижение перегрузки.

Диапазон значений параметра Херста для самоподобного потока составляет от 0,5 до 1. Самоподобие рассматривается как свойство трафика сохранять свой характер при изменении масштаба времени. Параметр Херста является мерой долговременной памяти самоподобного потока. Он используется для измерения степени корреляции между последовательными значениями данных во временном ряду. Прогнозирование значений трафика и тенденций в структуре трафика можно определить по параметру Херста. Высокое значение параметра Херста означает, что существует сильная корреляция между последовательными значениями данных, а это означает, что характеристики трафика, вероятно, останутся неизменными во времени. И наоборот, низкое значение параметра Херста указывает на то, что корреляция между последовательными значениями данных незначительна или отсутствует, а это означает, что характеристики трафика могут быть более неустойчивыми и непредсказуемыми. Существует несколько методов оценки параметра Херста [135]. Самоподобные потоки характеризуются значительно большим разбросом временных интервалов между поступлениями

запросов, чем для простейшего потока. При этом распределение временного интервала между запросами отличается от экспоненциального распределения [136].

Принятую модель трафика можно использовать при выборе модели системы его обслуживания. Поскольку основными задачами являются: выбор объема ресурсов и оценка качества функционирования, используемая для этого модель СМО должна быть адекватна модели, выбранной для представления потока.

3.3.2 Системы массового обслуживания

Запросы, как правило, приходят в случайное время. Сеть использует определенное количество ресурсов при обслуживании каждого запроса. Когда на момент получения запроса в сети нет свободных ресурсов, запрос помещается в очередь или ему отказывают в обслуживании в соответствии с используемой дисциплиной обслуживания. Есть две основные дисциплины обслуживания: с ожиданием и с отказами.

В сетях с коммутацией каналов используется дисциплина обслуживания с отказами, а в сетях с коммутацией пакетов (сообщений) – комбинированная дисциплина обслуживания, допускающая как потери, так и ожидание.

Возможно использование дисциплин с приоритетным обслуживанием, когда разные запросы могут иметь разные приоритеты. В этом случае запрос с более высоким приоритетом помещается в очередь перед запросом с более низким приоритетом.

Сеть связи может быть представлена в виде системы массового обслуживания СМО. Функционирование СМО определяется свойствами и

параметрами трафика, пропускной способностью и может быть описано параметрами качества обслуживания (задержкой в буфере и вероятностью потерь). Модели качества обслуживания традиционно определяются в соответствии с классификацией Кендалла-Башарина [137].

В теории массового обслуживания время между поступлениями и объем трафика являются двумя наиболее важными понятиями, и они образуют естественную двойственность. Время между поступлениями запросов понимается как интервал времени между поступлением двух последовательных пакетов. Оно рассчитывается для каждого пакета данных после первого и часто усредняется для получения среднего времени между поступлениями пакетов.

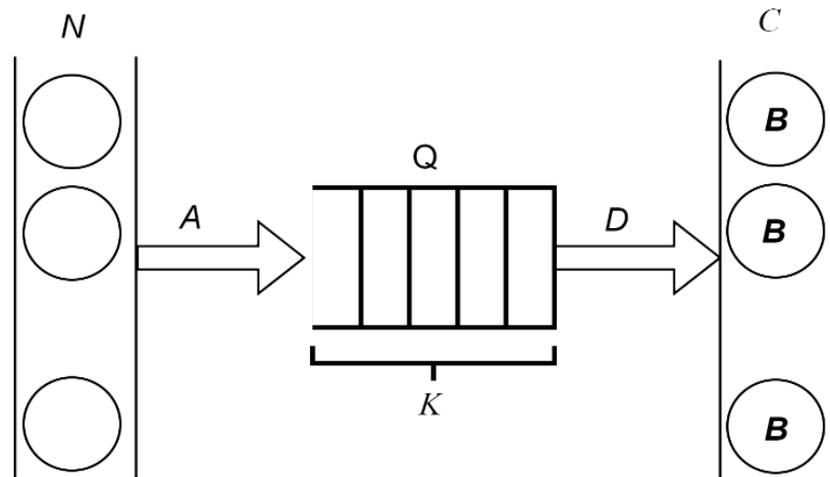


Рисунок 3.1 – Система массового обслуживания

На Рисунке 3.1 показан пример системы массового обслуживания с N источниками трафика.

N – число источников трафика

A – поступающий поток

Q – буфер

K – число мест для ожидания

C – число обслуживающих устройств

B – длительность обслуживания

D – дисциплина очереди

Стандартные символы для процессов трафика приведены в таблице 3.1 с описанием интервалов между поступлениями запросов и длительностью обслуживания.

Таблица 3.1 – Стандартные символы для процессов трафика

N	Символ	Наименование	Значение
1	M	Markovian. Exponential time intervals (Poisson arrival process, exponentially distributed service times).	Марковский процесс (простейший поток)/ Экспоненциальное распределение
2	D	Deterministic flow; constant interarrival times; constant service times	Детерминированный поток/ Детерминированное время обслуживания.
3	E_k	Erlang- k of inter-arrival times; k service time distribution ($E_I = M$).	Поток Эрланга k -параметр формы / Распределение Эрланга.
4	G	General inter-arrival times; General service times distribution.	Общий вид распределения.

Д. Кендалл предложил следующие обозначения для моделей систем с ожиданием [172]:

A/B/n

A = поступающий поток

B = распределение длительности обслуживания

n = число обслуживающих устройств

Как правило, модели массового обслуживания описываются следующими нотациями:

$M/M/n$ — это система с пуассоновским поступающим потоком, экспоненциально распределенным временем обслуживания и числом n обслуживающих устройств.

$G/G/1$ — это система с произвольным поступающим потоком и одним обслуживающим устройством.

В конкретных случаях может потребоваться дополнительная информация:

$$A / B / n / K / N / D$$

где:

K = емкость системы в целом или возможное число мест в очереди,

N = размер пакета

D = дисциплина ожидания

Дисциплины ожидания классифицируются следующим образом:

1. **FCFS** Первым пришел – первым обслужен. Имеет также название справедливой очереди. Очень часто обозначается также как. It is often called a fair queue or an ordered queue. **FIFO**: Первым пришел – первым покинул очередь.

2. **LCFS** Последним пришел – первым обслужен. Дисциплина также известна под названием **LIFO**: Последним пришел – первым покинул очередь.

3. **SIRO** Обслуживание в случайном порядке. Все пакеты, находящиеся в очереди, имеют одну и ту же вероятность обслуживания. Также имеет название **RANDOM** или **RS** (Случайный выбор).

3.4 Разработка комплексной модели трафика для реализации на сети услуг интернета вещей, тактильного интернета и дополненной реальности

3.4.1 Системная модель и постановка задачи

В данной работе, системная модель включает три вида генераторов трафика: тактильного трафика, обозначенного как H2H+TI (H2H – Human to Human, TI – тактильный интернет), трафика дополненной реальности (AR) и генератора трафика IoT, имитирующего одно или несколько устройств IoT. Все эти генераторы объединяются в один узел и объединенный поток поступает в систему массового обслуживания (СМО) с комбинированной дисциплиной обслуживания, как показано на Рисунке 3.2.

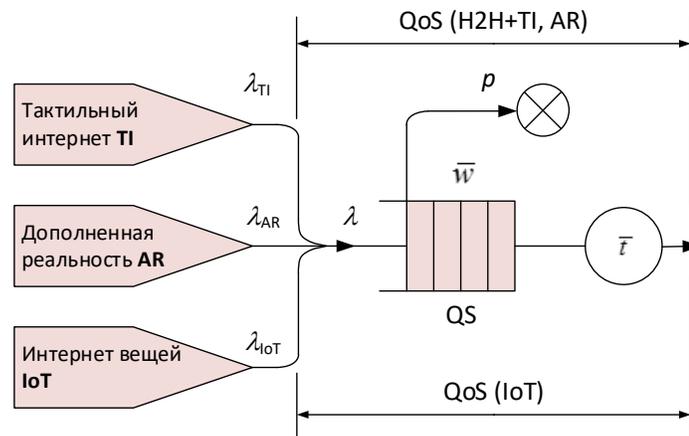


Рисунок 3.2 – Системная модель

Трафик, генерируемый устройствами IoT, подразделяется на три характерных типа трафика [105, 108]:

- а) детерминированный;
- б) служебный;
- с) опосредованный.

Трафик, генерируемый устройствами IoT, может обслуживаться вместе с трафиком других услуг связи. Поскольку характер трафика IoT обычно отличается от трафика других услуг сети, необходимо оценивать его характеристики, а также влияние на QoS других услуг при планировании сетей связи [107].

В данной работе QoS 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} (Рисунок 3.2). 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.

Ниже приведены оценки показателей QoS отдельно для тактильного потока интернет-трафика (H2H+TI), потоков трафика дополненной реальности и IoT.

3.4.2 Аналитическая модель

Рассмотрим аналитическую модель для оценки вероятности потерь и задержки пакетов за счет времени ожидания в очереди и длительности обслуживания, представленную моделью G/G/1/k.

Для оценки вероятности потери пакетов при известных параметрах распределения, описывающих трафик и процесс обслуживания пакетов [107, 109], может быть использовано выражение:

$$p = \frac{1 - \rho}{1 - \rho \frac{2}{c_a^2 + c_s^2} n_b + 1} \rho \frac{2}{c_a^2 + c_s^2} n_b \quad (3.1)$$

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 [105, 110]:

$$T = \frac{\rho \bar{t}}{2(1 - \rho)} \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left(\frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t} \quad (3.2)$$

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.

Известно, что потоки трафика TI и AR обладают свойствами самоподобных потоков. Трафик же IoT можно отнести к детерминированным потокам [105, 108, 110], поскольку зачастую в приложениях IoT этот трафик формируется путем периодического процесса отправки данных системы мониторинга и/или диспетчерского управления [106].

3.4.3 Имитационная модель

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. Трафик H2H + TI

имеет распределение Парето в соответствии с [102, 104] с функцией плотности вероятности

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha x_m^\alpha}{x^{\alpha+1}} & x \geq x_m; \\ 0 & x < x_m, \end{cases} \quad (3.3)$$

где x_m и α – параметры распределения.

Математическое ожидание и дисперсия определяются следующим образом:

$$E(x) = \frac{\alpha x_m}{\alpha - 1} \quad (3.4)$$

$$V(x) = \frac{\alpha x_m^2}{(\alpha - 1)^2(\alpha - 2)} \quad (3.5)$$

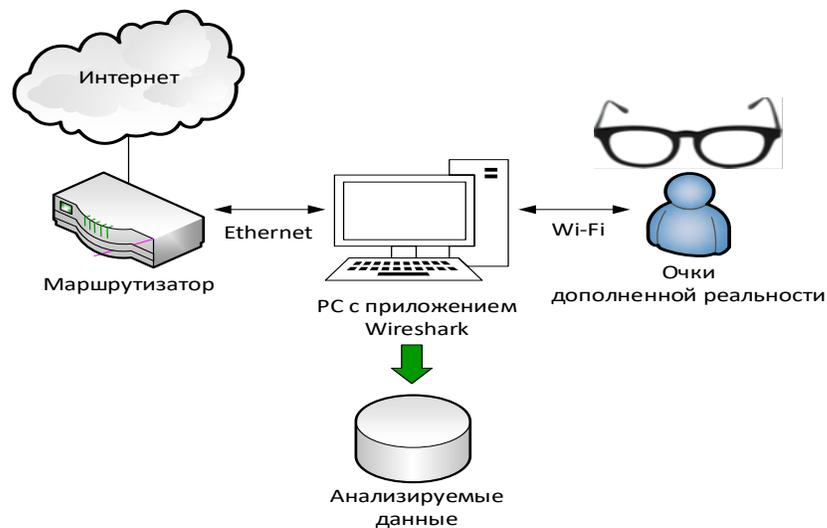


Рисунок 3.3 – Моделирование трафика дополненной реальности

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 (Рисунок 3.3).

Функция плотности вероятности длительности обслуживания для AR показана на Рисунке 3.4.

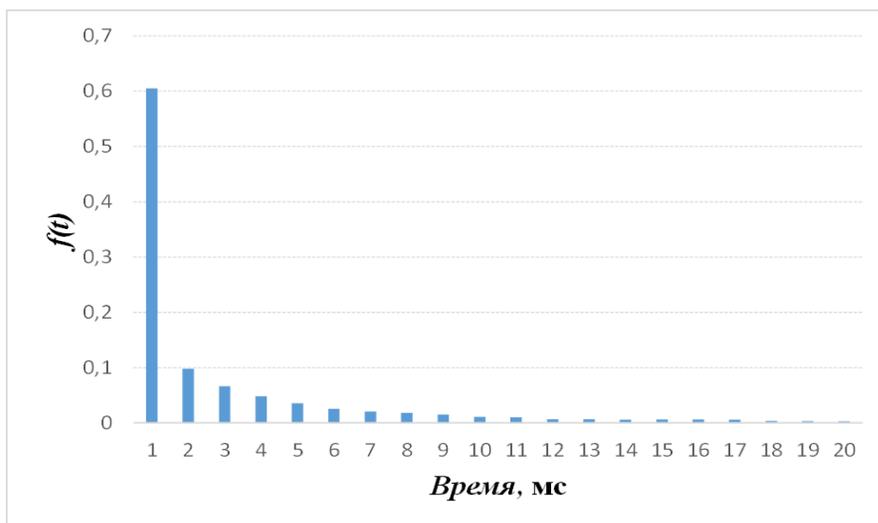


Рисунок 3.4 – Функция плотности вероятности длительности обслуживания AR

Примеры реализации самоподобного потока для используемой модели с коэффициентом Херста $H = 0,88$ и простейшего потока с $H = 0,5$ представлены на Рисунке 3.5.

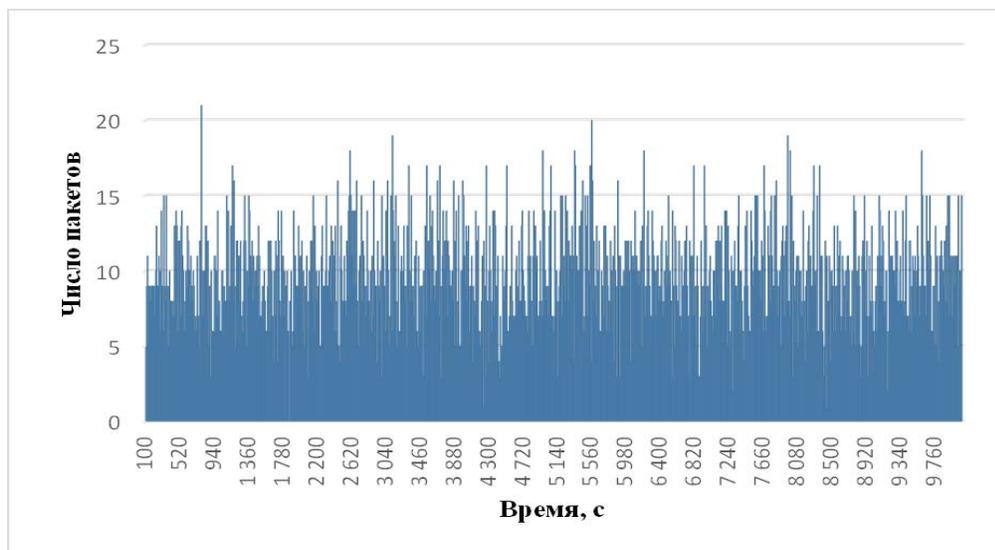


Рисунок 3.5 – Самоподобный и простейший потоки трафика

Пример реализации агрегированных потоков трафика для TI, AR и IoT с коэффициентом Херста $H = 0,6$ приведен на Рисунке 3.6.

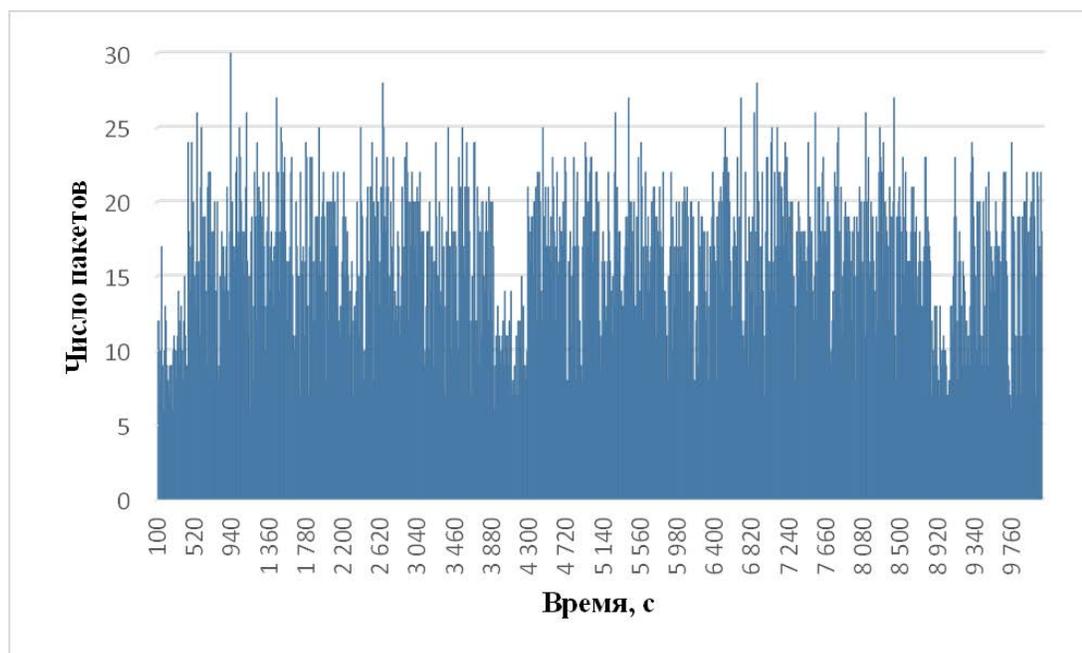


Рисунок 3.6 – Агрегированные потоки трафика

Коэффициенты Херста оценивались путем оценки изменения дисперсии. Диаграммы зависимости дисперсии для входящих и исходящих потоков с интервалами агрегированных потоков показаны на Рисунке 3.7.

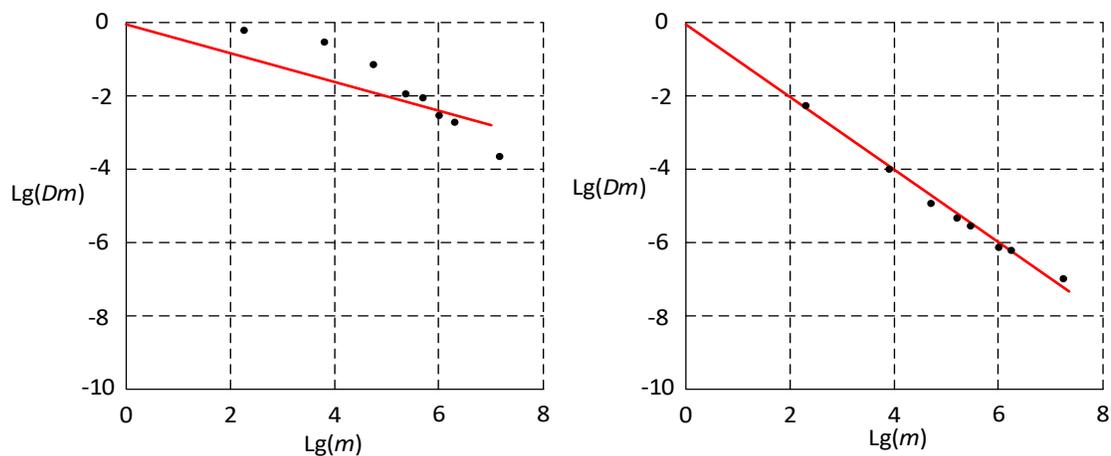


Рисунок 3.7 – Коэффициенты Херста для входящего ($H = 0,731$) и исходящего ($H = 0,515$) потоков

3.4.4 Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования с использованием Anylogic, а также математической модели, представленной в уравнениях (3.1) и (3.2).

На Рисунках 3.8 и 3.9 приведена оценка вероятности потерь в зависимости от интенсивности нагрузки ρ при разных размерах буфера $n = 2$ и 10 . Штриховые кривые – результаты, полученные по формуле (3.1), а сплошные – оценки моделирования на Anylogic. Для детерминированного потока вероятность потери пакетов в зависимости от интенсивности нагрузки получена для трафика IoT, черные пунктирные и сплошные кривые на Рисунках 3.8 и 3.9 показывают результаты для размеров буфера 2 и 10. Видно, что вычисления, проведенные по (3.1), дают несколько завышенный коэффициент потерь в обоих случаях для размеров $n = 2$ 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 (3.1). Как видим, вычисления по формуле (3.1) также дают несколько завышенный коэффициент потерь при размере буфера $n = 2$. В то же время для размера буфера $n = 10$ результаты вычислений дают несколько заниженное значение коэффициента потерь при использовании формулы (3.1). Заметим также, что вероятность потерь с точки зрения AR несколько ниже вероятности потерь для TI и выше, чем для IoT-трафика.

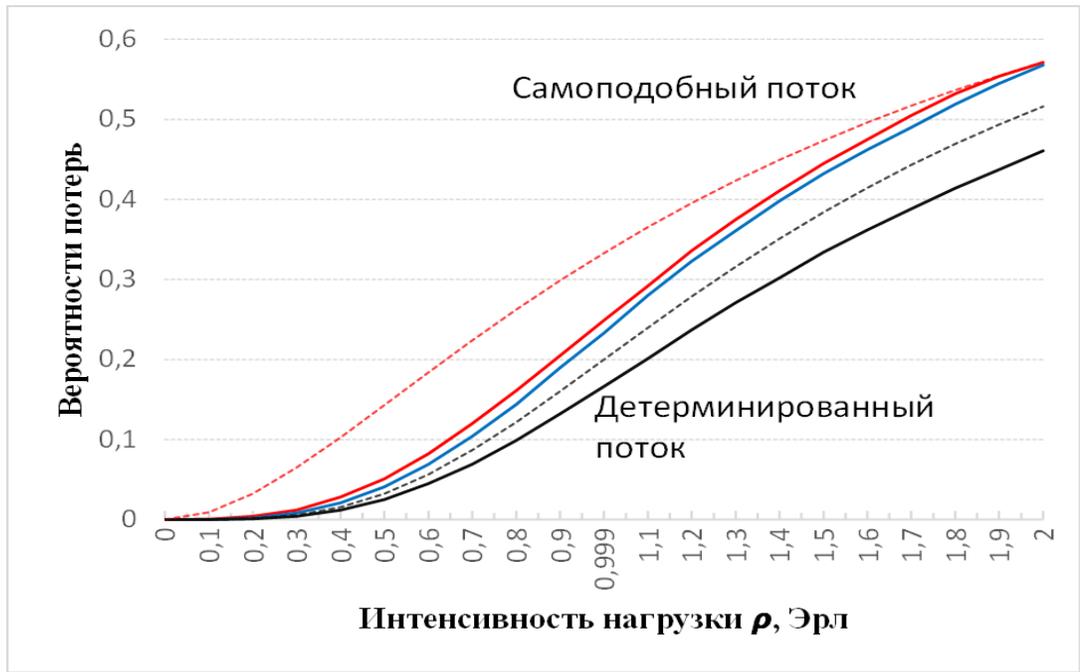


Рисунок 3.8 – Вероятность потерь в зависимости от интенсивности нагрузки, размер буфера ($n = 2$)

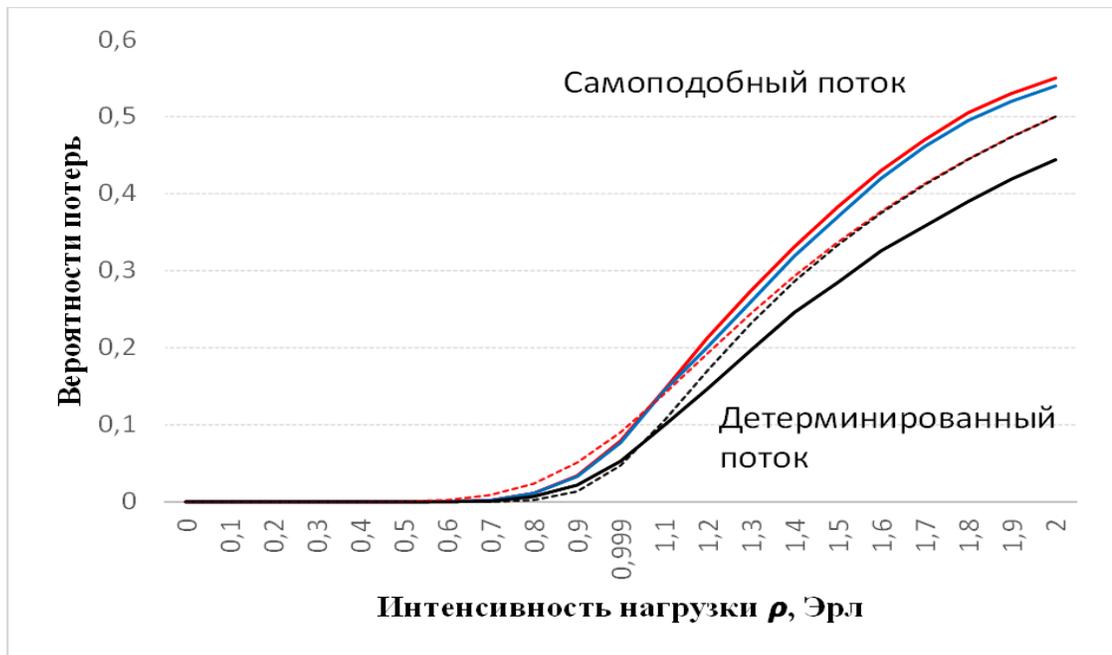


Рисунок 3.9 – Вероятность потерь в зависимости от интенсивности нагрузки, размер буфера ($n = 10$)

Видно что, при размера буфера $n = 10$ результаты вычислений дают значение коэффициента потерь меньше чем коэффициента потерь в случае размере буфера $n = 2$.

На Рисунках 3.10 и 3.11 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 (3.2) с буфером размерами $n = 2$ и 10.

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

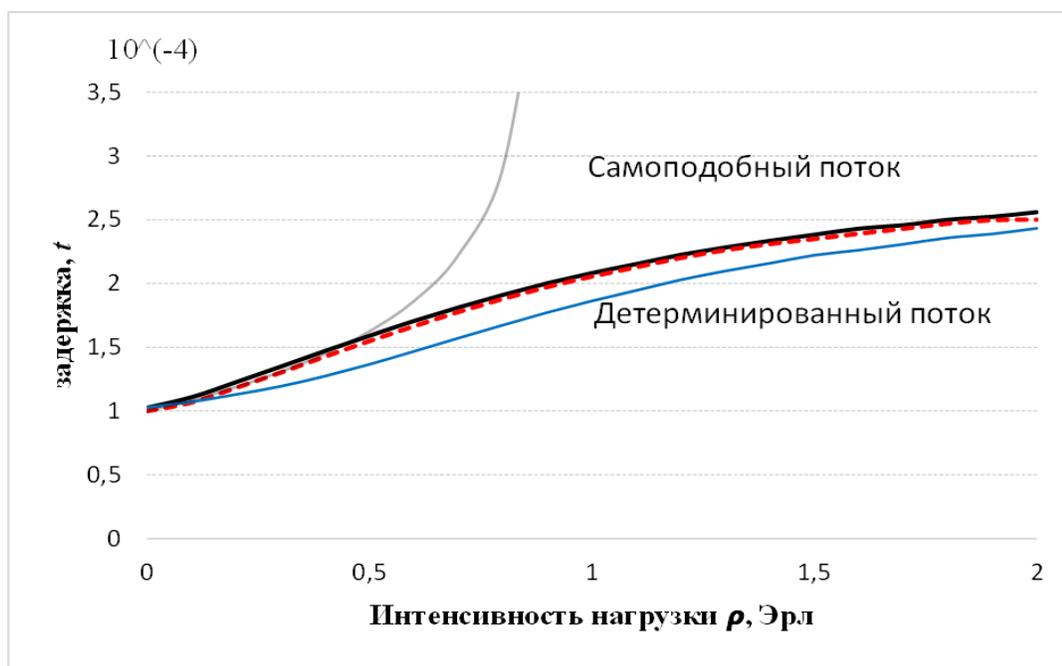


Рисунок 3.10 – Задержка доставки пакетов в зависимости от интенсивности нагрузки, размер буфера ($n = 2$)

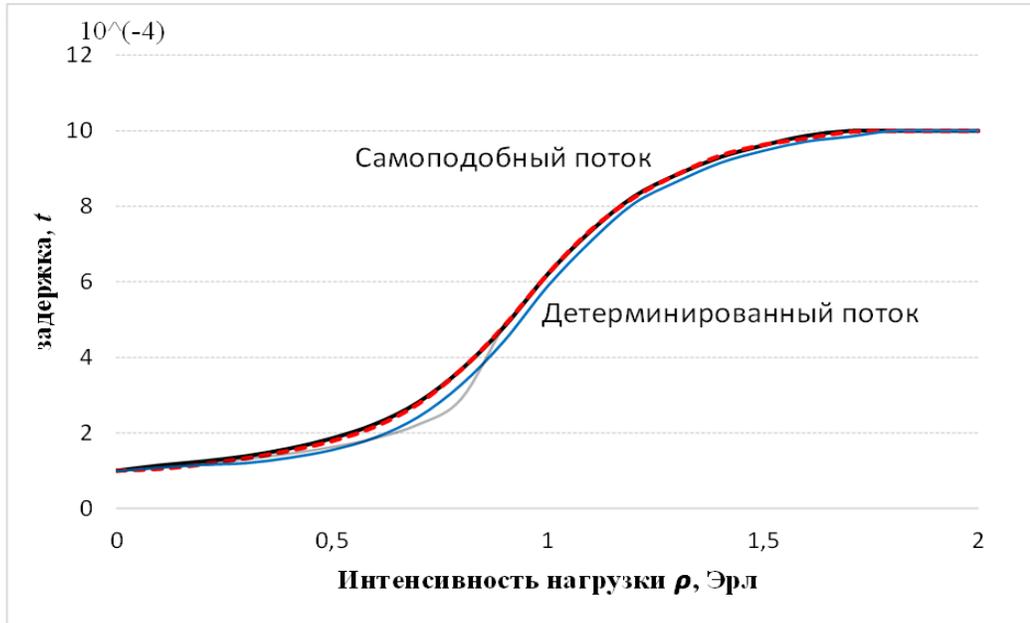


Рисунок 3.11 – Задержка доставки пакетов в зависимости от интенсивности нагрузки, размер буфера ($n = 10$)

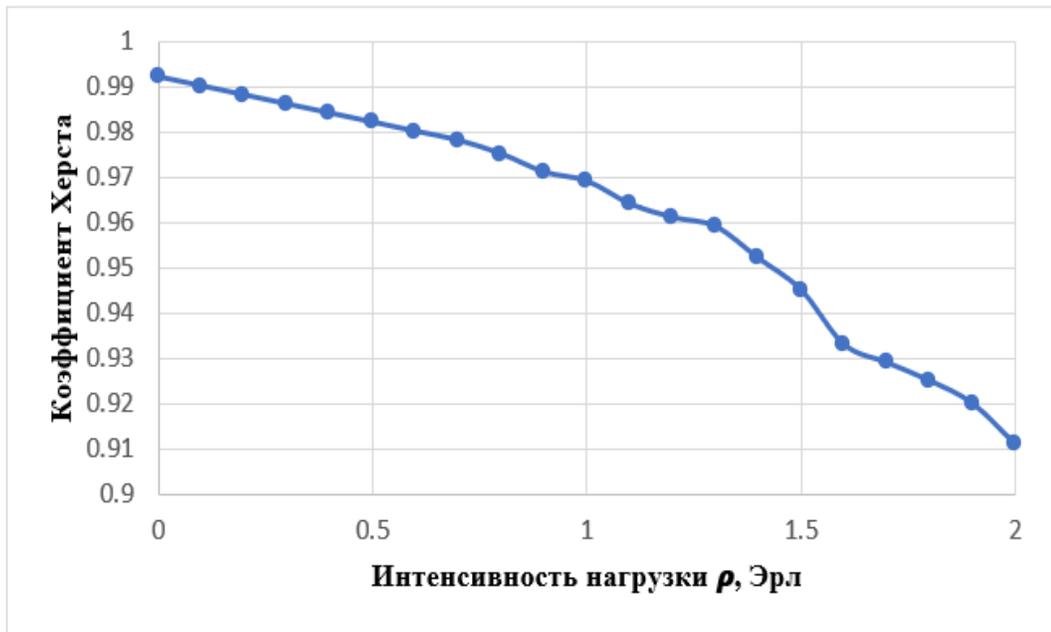


Рисунок 3.12 – Коэффициент Херста обслуженного потока в зависимости от интенсивности нагрузки, размер буфера $n = 2$

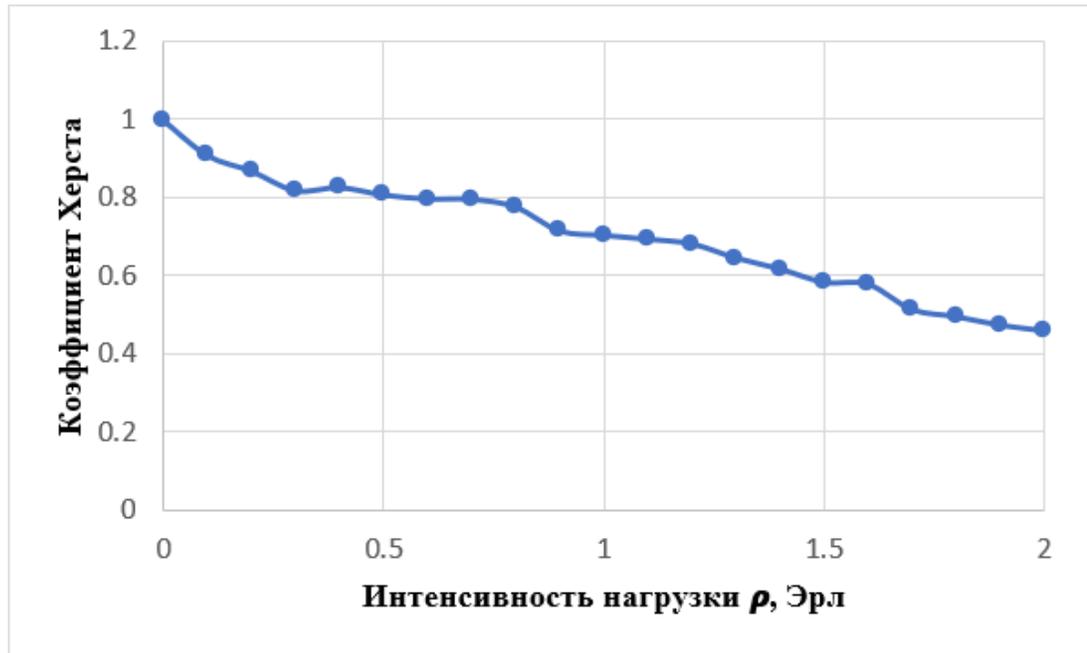


Рисунок 3.13 – Коэффициент Херста обслуженного потока в зависимости от интенсивности нагрузки, размер буфера $n = 10$

Зависимости коэффициентов Херста от интенсивности нагрузки показаны на Рисунках 3.12 и 3.13 при разных размерах буфера. Из рисунков видно, что в обоих случаях ($n = 2$ и 10) коэффициенты Херста обслуженного потока уменьшаются при увеличении интенсивности загрузки ρ СМО.

3.5 Выводы

В третьей главе было проведено исследование современных моделей трафика для сетей связи пятого и последующих поколений. При этом были получены следующие основные результаты:

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. 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.

3. 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 ($H2H+TI$ и AR) 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.

4. 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).

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫГРУЗКИ ТРАФИКА ПРИ ИНТЕГРАЦИИ РЕСУРСОВ БПЛА И ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГРАНИЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

4.1. Введение

В настоящее время появляется все больше и больше новых технологий, способных упростить и автоматизировать повседневную деятельность человека. Одной из таких перспективных технологий, применимых в сетях связи пятого поколения связи 5G/IMT-2020, являются сети беспилотных летательных аппаратов [138].

Беспилотные летательные аппараты являются важнейшей составляющей поддержки наземных сетей. Поэтому, они могут внести значительный вклад в обеспечение дополнительного функционального разнообразия при поддержке сетей связи пятого и последующих поколений. Более того, из-за простоты развертывания сетей БПЛА их можно использовать в различных коммерческих приложениях и гражданских целях, таких как съемка и картографирование, воздушные базовые станции, поиск и спасательные операции, а также мониторинг, обеспечение подключения, управление трафиком и т. д. Кроме того, критерии производительности сетей 5G в контексте повышенной надежности, низкой задержки, пиковой пропускной способности, высокой скорости и низкого энергопотребления делают БПЛА одним из наиболее важных системных решений для достижения всех целей, упомянутых выше [127, 128].

В первой главе упоминалось множество вариантов использования БПЛА, которые в целом можно разделить на два важных направления: БПЛА, работающий как часть инфраструктуры беспроводной связи, и БПЛА, функционирующий как мобильный терминал. Кроме того, пропускная способность наземных базовых станций может быть увеличена с использованием БПЛА. В той же степени это относится и к покрытию территории базовой станцией. Кроме того, БПЛА могут выполнять функции временных головных узлов кластеров для беспроводных сенсорных сетей и сетей Интернета Вещей, эффективно использоваться при решении задач умных городов [152]. Рои БПЛА целесообразно использовать и для решения задач воздушных сетей связи [153]. Естественно, что использование как одиночных БПЛА, так и роев БПЛА может обеспечить в необходимых случаях требования по надежности и качеству обслуживания [154]. В целом, использование БПЛА в сетях связи позволяет реально подойти к решению проблемы создания комбинированных наземно-воздушных сетей связи [155].

Развитие сетей БПЛА сделало возможным сбор данных с сенсорных устройств. Так появились летающие всепроникающие сенсорные сети FUSN (Flying Ubiquitous Sensor Networks) [129, 139]. Данный тип сетей широко используется во многих сферах жизнедеятельности человека, например, в сельском хозяйстве, при стихийных бедствиях и т.д. [140]. Наиболее эффективными являются следующие сценария использования сетей БПЛА как отмечалось в первой главе:

1. Увеличение зоны покрытия.

БПЛА в данном сценарии можно использовать как для разгрузки определенных участков сети с увеличенным числом пользовательских устройств (в этом случае участки сети могут быть перегружены большими объемами пользовательского трафика), так и для быстрого восстановления связи на

территориях, где сетевая инфраструктура была полностью или частично повреждена из-за возникновения различных стихийных бедствий.

2. Передача информации от удаленных пользователей.

БПЛА может использоваться для передачи данных между достаточно удаленными друг от друга пользователями в тех случаях, когда обмен данными невозможно осуществить с использованием стандартной архитектуры сети связи.

3. Сбор данных с сенсорных полей.

В данном сценарии БПЛА используются для сбора информации с наземных сенсорных устройств.

В этой главе, исследуются проблемы интеграции сети беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и программно-конфигурируемых сетей (software-defined networks, SDN). Представлены два способа построения сетей БПЛА с технологией SDN: когда базовая станция выполняет функции контроллера SDN и когда БПЛА используются в качестве контроллеров SDN. Подробно рассмотрен метод организации сети БПЛА для сбора данных с сенсорных полей. При этом сетевая структура БПЛА распределена по нескольким кластерам, что, в свою очередь, требует выбора головного узла для взаимодействия с контроллером SDN. Все вопросы рассматриваются в увязке с намечающимся широким применением в сетях связи технологий граничных вычислений.

При этом исследуются также проблемы выгрузки трафика при использовании летающего узла граничных вычислений, расположенного на БПЛА. Помимо этого, рассматривается и вариант использования БПЛА в качестве ретранслятора.

4.2 Архитектура сети БПЛА для сенсорных сетей

Сети БПЛА для сенсорных сетей представляют собой беспроводные летающие сенсорные сети, которые состоят из двух сегментов [139]:

- **летающий сегмент**, который может быть организован как одиночными БПЛА, так и их группами (вопросы построения роев БПЛА рассмотрены в [141, 142]);
- **наземный сегмент**, в качестве устройств которого можно рассматривать различные сенсорные узлы, которые могут создавать самоорганизующиеся сети (например, сенсорные узлы, взаимодействующие между собой по протоколам 6LoWPAN и ZigBee).

Кроме того, наземный и летающий сегменты могут быть архитектурно реализованы как одноранговые и иерархические (или кластерные) сети. Также БПЛА могут выступать в качестве временных головных узлов кластеров наземных сегментов [143].

Одним из преимуществ сетей БПЛА является возможность организовать связь в режиме реального времени без необходимости предоставления какой-либо инфраструктуры. Основные проблемы сетей БПЛА связаны со значительными потерями пакетов данных, большими задержками или возможностью нарушения процесса передачи информации из-за высокой мобильности БПЛА. Ограниченные энергоресурсы БПЛА также могут вызывать сбои и нарушение в работе сети. Поэтому обеспечение связи (особенно между отдельными БПЛА), а также снижение энергопотребления являются важными задачами в сетях БПЛА.

Чтобы организовать нормально функционирующую сеть БПЛА, необходимо определить, каким образом БПЛА будет взаимодействовать с наземным сегментом. Взаимодействие нескольких БПЛА также потребует организации в

летающем сегменте сети связи между отдельными беспилотными летательными аппаратами [144].

Беспилотные летательные аппараты в сети могут взаимодействовать друг с другом с помощью наземных станций управления. В данной работе предлагается рассмотреть следующие три архитектуры: централизованную, кластерную и сотовую.

1. Централизованная архитектура. В этом случае БПЛА обмениваются информацией с одной наземной базовой станцией (БС), другими словами, когда БПЛА взаимодействуют друг с другом, все пакеты данных передаются через наземную БС. Преимущества данной архитектуры: отказоустойчивость в случае отказа отдельных БПЛА, параллельное выполнение задач, улучшение вычислительных и запоминающих характеристик. Недостатки: пропорциональность пропускной способности сети плотности БПЛА, большие задержки, а также уязвимость наземных БС.

2. Архитектура кластеризации. В этой архитектуре летающий сегмент разделен на несколько кластеров, в которых один из БПЛА выбран в качестве головного узла. Этот головной узел обеспечивает взаимодействие всех БПЛА внутри одного кластера и взаимодействие БПЛА кластера с наземной БС. Преимущество этой архитектуры: поддержка БПЛА с различными коммуникационными и летными характеристиками [145]. Недостатки: невозможность взаимодействия БПЛА одного кластера с БПЛА другого кластера при частичном или полном повреждении БС.

3. Сотовая архитектура. Эта архитектура делит летающий сегмент на несколько ячеек, каждая из которых использует свою уникальную полосу пропускания для предотвращения возникновения помех от других ячеек. БПЛА могут взаимодействовать друг с другом с помощью базовых станций или без них.

4.3 Применение SDN в сетях БПЛА

SDN – это сетевая структура с возможностями адаптивного и динамического управления, в которой плоскость данных отделена от плоскости управления, а также позволяет осуществлять программное управление сетью и абстрагирование уровня приложений и сервисов (сетевых сервисов) от уровня сетевой инфраструктуры [146].

SDN рассматривается как подход к проектированию сети, основанный на прямом управлении сетями и их ресурсами, который посредством собственной обработки, программного управления и администрирования через открытые сетевые интерфейсы и изоляцию от сетевого уровня обеспечивает распределение ресурсов сетей [146].

Рассмотрим далее возможности использования технологий программно-конфигурируемых сетей для сетей БПЛА.

Прежде всего, отметим, что на данный момент при проектировании сетей БПЛА, помимо описанных выше проблем, возникает и ряд других, в том числе [147]:

- высокий спрос на определенный тип трафика, что, в свою очередь, приводит к возможной перегрузке сети и увеличению потребления электроэнергии;
- прерывания связи между БПЛА и фрагментация сети, вызванная высокой мобильностью БПЛА;
- необходимость знания глобального представления о сети для обеспечения высокой эффективности развертывания БПЛА;
- ограниченные ресурсы сети БПЛА и возможности обеспечения взаимодействия БПЛА с наземным сегментом сети (например, взаимодействие БПЛА с БС или узлами сенсорных полей).

Концепция SDN сетей благодаря ряду ее преимуществ, таких как гибкое централизованное управление сетью, возможность настройки программного обеспечения, отделение уровня управления от уровня передачи данных, независимость сетевой инфраструктуры от поставщиков оборудования и использование открытых стандартов, может решить эти проблемы. При этом БПЛА могут рассматриваться как коммутаторы SDN, а базовые станции, которые собирают информацию с БПЛА и контролируют определенные аспекты работы сети – как контроллеры SDN.

Таким образом, применение концепции SDN в сетях БПЛА позволит:

1) Оптимизировать балансировку нагрузки между БПЛА и базовыми станциями.

2) Организовать централизованное управление сетью, что даст возможность не только более эффективно использовать ресурсы, но и улучшить качество обслуживания.

3) Уменьшить потерю пакетов и нагрузку на сеть, а также предоставить возможность гибкого распределения радиоресурсов и перенастройки сети (эта функция программно-конфигурируемых сетей может быть реализована с использованием одного или нескольких контроллеров SDN).

4) Динамически регулировать движение БПЛА в трехмерном пространстве.

Также стоит отметить, что если протокол OpenFlow рассматривается как основной протокол «Южного интерфейса» для передачи пакетов в сети БПЛА (как уже упоминалось ранее, БПЛА в сети с технологиями SDN будут выполнять функции коммутаторов SDN), то при развертывании сети необходимо учитывать решение следующих проблем:

- Адаптация контроллера к изменению масштаба сети и объема передаваемого трафика.

- Уязвимость контроллеров для сервисных атак.

- Обеспечение динамического управления всей сетевой структурой.

- Отсутствие синхронизации между временем установки правил и временем прибытия пакетов, а также отсутствие согласованности в обработке одних пакетов данных и установке правил для изменения, отбрасывания и передачи других.

4.4 Разработка метода выгрузки трафика из наземной сети на БПЛА, когда базовые станции используются в качестве контроллеров и когда БПЛА используются в качестве контроллеров SDN

На Рисунке 4.1 показана архитектура сети БПЛА с интеграцией технологии программно-конфигурируемых сетей, в которой отдельные БПЛА действуют как коммутаторы SDN, а базовые станции наземного сегмента сети БПЛА работают как контроллеры SDN. На том рисунке показана система, в которой беспилотные летательные аппараты могут использоваться для сбора данных с сенсорных полей.

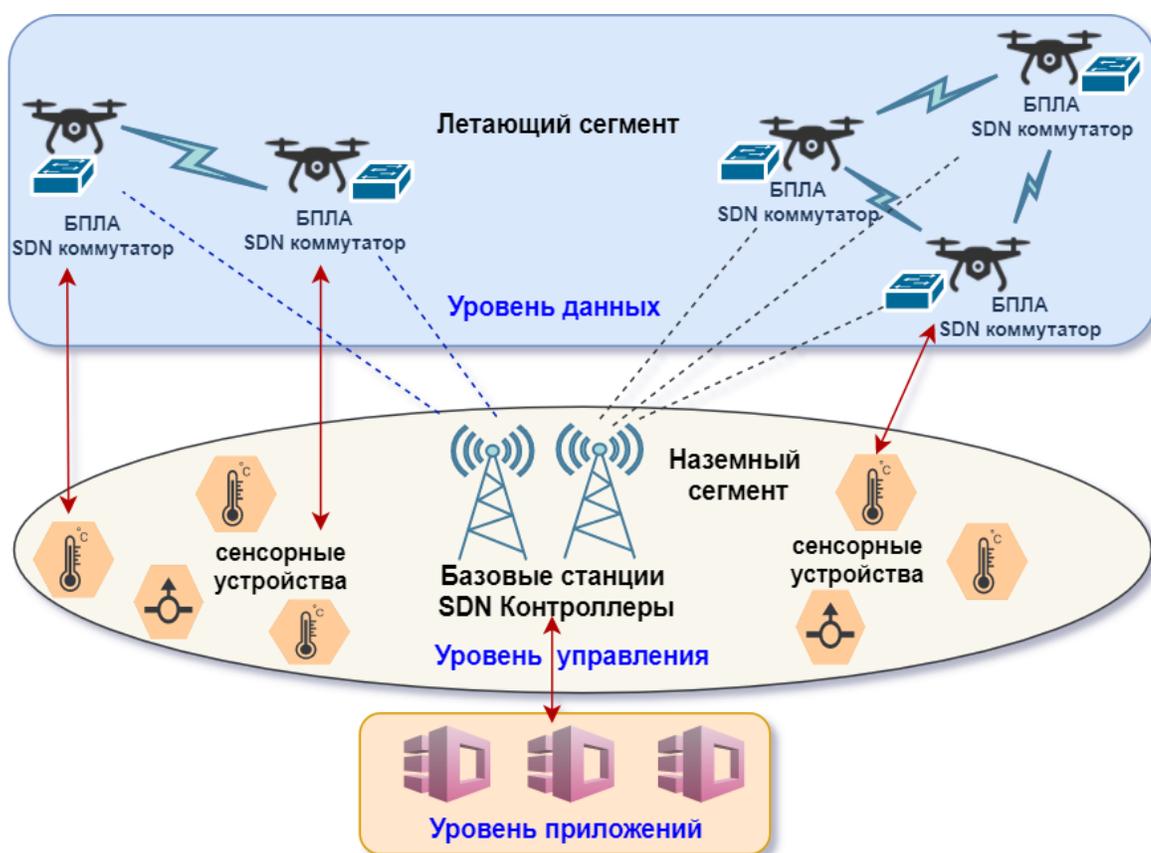


Рисунок 4.1. – Сетевая архитектура БПЛА с контроллерами SDN в наземном сегменте

На Рисунке 4.2 также показана архитектура сети БПЛА с интеграцией технологий SDN, однако вместо базовых станций 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.

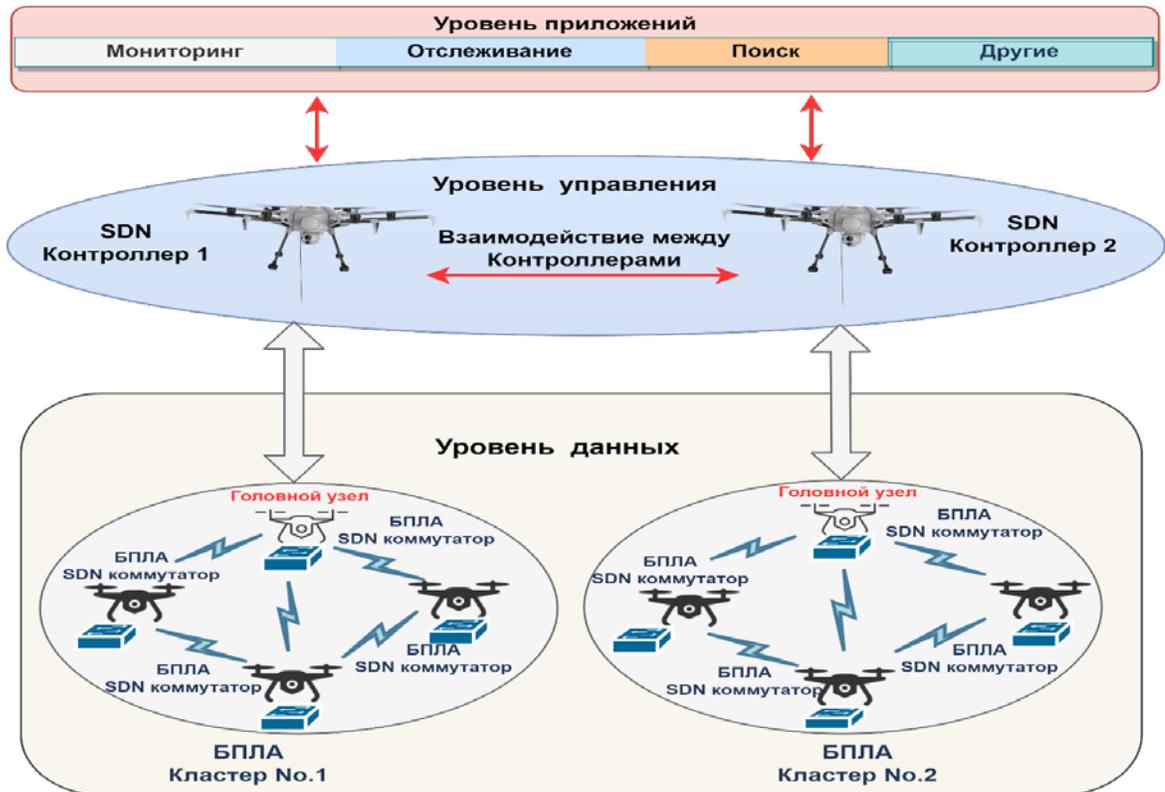


Рисунок 4.2 – Сетевая архитектура БПЛА с контроллерами SDN в летающем сегменте

Обмен данными между БПЛА в данной архитектуре внутри одного кластера может осуществляться напрямую без участия головного узла. Кроме того, на уровне приложений в сети, как показано на Рисунке 4.2, сетевые функции могут быть представлены в виде программных модулей [148].

В следующем разделе будут рассмотрены два метода кластеризации, а именно алгоритма кластеризации k-средних (k-means) и Формальный Элемент (Foreign Element FOREL) для реализации данной задачи.

4.4.1 Алгоритмы кластеризации k -средних и FOREL

4.4.1.1 Алгоритм k -средних (k -means)

Действие алгоритма заключается в том, что он стремится минимизировать суммарный квадрат отклонения элементов кластеров от центров этих кластеров. Минимизируемая функция записана как:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2 \quad (4.1)$$

где k - количество кластеров;

S_i - множество элементов i -го кластера;

μ_i - координаты центра масс i -го кластера;

x_j - координаты центра масс j -го элемента кластера.

$(x_j - \mu_i)$ - представляет евклидово расстояние между элементом кластера и центром масс кластера.

Для двумерного пространства, каждый элемент рассматривается как точка на плоскости и характеризуется своими координатами (x_j, y_j) .

Координаты центра масс i -го кластера определяются как:

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j, \quad y_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j \quad (4.2)$$

где n_i - представляет количество точек данных в i -го кластере.

Шаги алгоритма:

1. Пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ набор точек данных, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ набор центры кластеров, и требуемого числа кластеров (k);

2. Рассчитать расстояние между каждой точкой данных и центрами кластеров с использованием евклидовой метрики расстояния:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2} \quad (4.3)$$

3. Назначать точку данных центру кластера, чье расстояние от центра кластера является минимальным среди всех центров кластера.

4. Пересчет нового центра кластера с использованием (4.2).

5. Пересчитать расстояние между каждой точкой данных и новыми полученными центрами кластеров.

6. Если ни одна точка данных не была переназначена, остановитесь, в противном случае повторите с шага 3).

Преимуществами алгоритма k -средних являются скорость выполнения и простота реализации, но у него есть и недостатки:

- перед запуском алгоритма необходимо указать число кластеров, также необходимо правильно определить число кластеров, так как от этого зависят результаты конечного разбиения;

- он чувствителен к выбору начальных точек для кластерных центров (предполагается, что центры кластеров на начальном этапе будут выбираться случайным образом, что, в свою очередь, может выступать источником ошибки).

Алгоритм не может решить проблему, если объект можно отнести к нескольким кластерам с одинаковым предпочтением или нет возможности отнести объект к какому-либо из возможных образуемых кластеров.

4.4.1.2 Алгоритм кластеризации FOREL

Алгоритм FOREL (Formal Element) также используется для решения задачи кластерного анализа путем минимизации суммарного квадратичного отклонения элементов кластера от центров масс этих кластеров.

В FOREL алгоритм определяется размер кластера R , а не число кластеров как в алгоритм k -средних. В двумерной задаче на геометрической плоскости, под R понимается максимальное расстояние от элемента кластера до его центра масс (радиус). Каждый элемент также рассматривается как точка на плоскости и характеризуется своими координатами $(x_j - y_j)$.

Координаты центра масс i -го кластера определяются согласно (4.2).

Шаги алгоритма:

1. Заданы центры кластеров, случайным образом выбрав k точек данных из набора данных.
2. Рассчитать расстояние между каждой точкой данных и центрами кластеров.
3. Назначать каждую точку данных ближайшему центру кластера.
4. Пересчитать новые центры кластеров, взяв среднее значение всех точек данных, назначенных этому центру кластера.
5. Повторять шаги 2–4 до тех пор, пока не перестанут изменяться назначения кластеров или не будет достигнуто максимальное количество итераций.

Преимущества метода FOREL:

- возможность более точного описания кластеров произвольной формы; из-за изменения радиуса R можно описывать кластеры, которые имеют разные

требования к детализации (более высокое значение R для сферической формы кластеров, более низкое значение для сложных форм);

- предоставление возможностей для выполнения операций над центрами кластеров, проверки гипотез компактности и подобия, вычисления функционалов промежуточного качества;

- более наглядное отображение процесса кластеризации.

Недостатки метода FOREL:

- низкая производительность;
- нестабильность, зависящая от объектов, выбранных в самом начале алгоритма;

- усложнение применения метода, если сложно реализовать разделение объектов на кластеры;

- перед запуском алгоритма необходимо определить радиус образующихся кластеров.

4.4.2 Постановка задачи кластеризации

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 Рисунок 4.2.

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.

В реальных условиях группа БПЛА может собирать данные с нескольких сенсорных полей. Следовательно, для рационального сбора данных со всей зоны распространения сенсорных устройств также необходимо определить маршрут движения БПЛА [149, 150]. Поскольку БПЛА распределены по нескольким кластерам, то область сбора информации с сенсорных устройств будет определяться не площадью одного БПЛА, а площадью всего кластера.

Управление потоками передачи данных и, следовательно, управление передачей пакетов данных в сети будет осуществляться стационарными привязными БПЛА [151]. 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 все эти задачи, используем алгоритмы, которые подробности были рассматривать в разделе 4.4.1 для решения поставленных задач:

а) Алгоритм k -средних для формирования кластеров БПЛА. Поскольку в реальных условиях размеры кластеров и плотность распределения между ними могут отличаться для разных групп кластеров, данный алгоритм наиболее подходит для формирования кластеров разного размера;

б) Алгоритм FOREL для определения пути движения групп БПЛА. Алгоритм позволяет формировать кластеры заданных радиусов. Центры определенных кластеров будут точками, из которых кластеры БПЛА смогут наиболее оптимальным образом собирать данные с узлов сенсорной сети. Таким образом, центры кластеров, определенные при выполнении алгоритма FOREL, будут задавать точки движения группы БПЛА. Алгоритм предлагается выполнять отдельно для каждой группы БПЛА (сформированного кластера БПЛА). Из-за этого список сенсорных полей, обслуживаемых группами БПЛА, может отличаться, а значит, и маршрут движения для разных групп будет разным. Например, на определенной местности могут быть размещены сенсорные поля, которые будут опрашиваться двумя группам БПЛА, а также сенсорные поля, данные от которых собирает только одна группа. Поскольку область сбора данных для кластеров БПЛА останется неизменной, FOREL является наиболее подходящим алгоритмом для решения задачи определения маршрута движения групп БПЛА.

Исходными данными для алгоритма k -средних будут количество сформированных кластеров, координаты предполагаемых центров кластеров и координаты БПЛА. В данной работе мы рассматриваем случай, когда число образующихся кластеров известно заранее. Алгоритм k -средних показан на Рисунке 4.3.

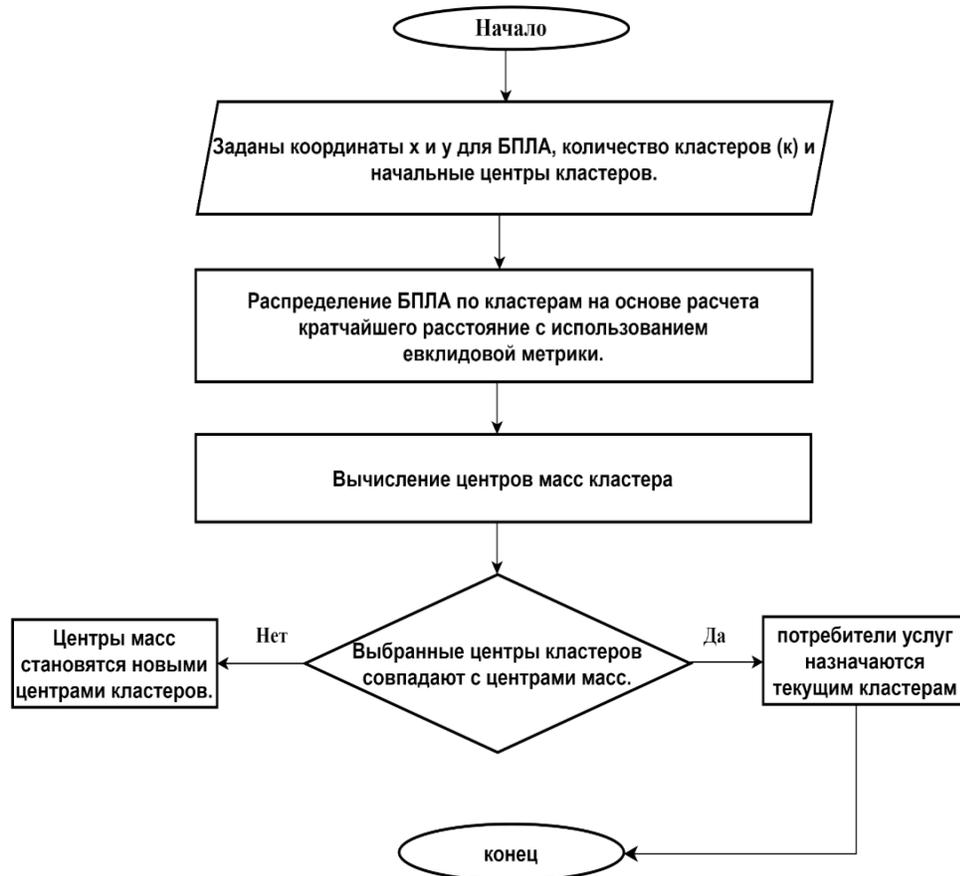


Рисунок 4.3 – Алгоритм k -средних для БПЛА

Исходными данными для алгоритма FOREL являются радиус кластеров, координаты предполагаемых центров кластеров и координаты сенсорных устройств. Размер зоны покрытия кластерной группы будет считаться радиусом кластера. Другими словами, радиус кластеров для алгоритма FOREL будет зависеть от области сбора кластеров, сформированных во время выполнения алгоритма k -средних. Алгоритм FOREL показан на Рисунке 4.4.

Для упрощения моделирования предлагается также заранее определять радиусы зон сбора данных от сенсорных устройств.

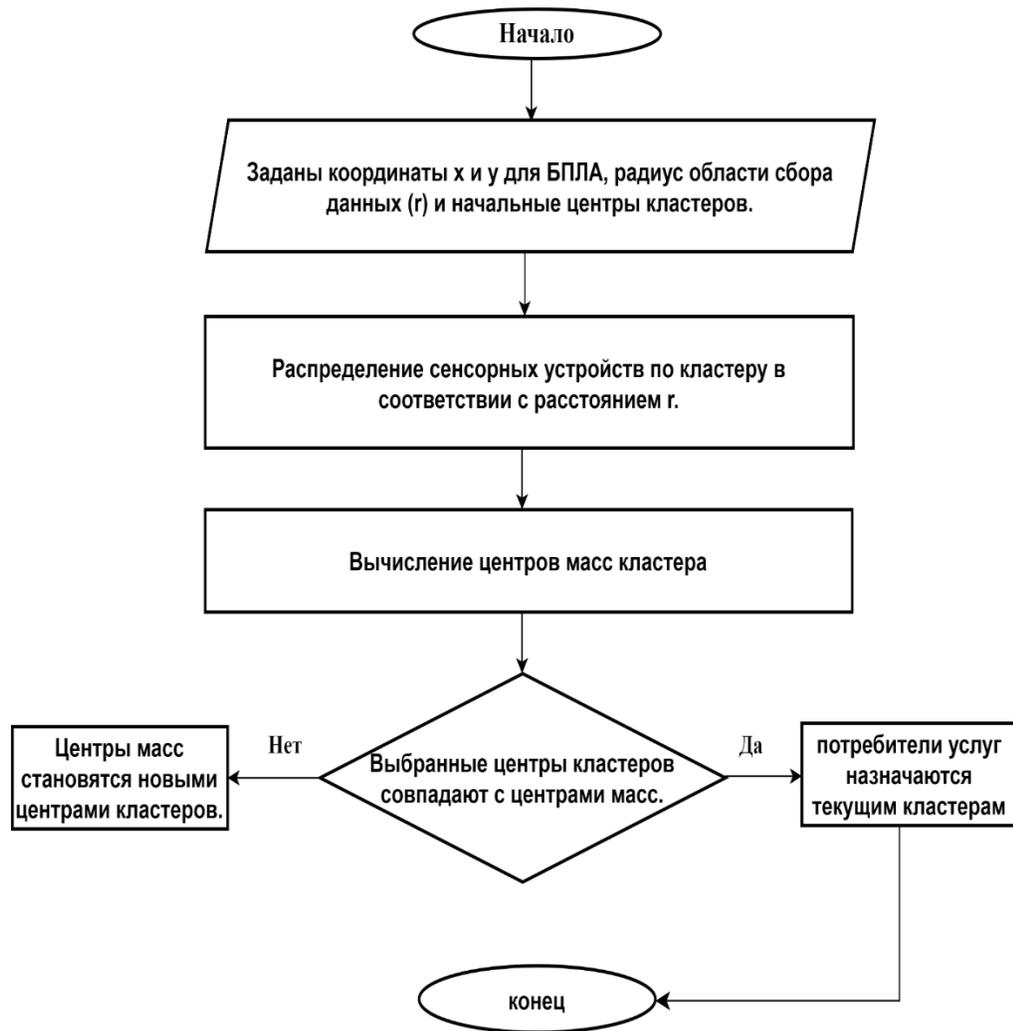


Рисунок 4.4 – Алгоритм FOREL для БПЛА

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:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i \quad (4.4)$$

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. В соответствии со значениями параметров CPU, память, батарея (остаточная энергия БПЛА) для пропускной способности сети предлагается учитывать только ту часть этих параметров, которая может быть использована в данный момент времени для выполнения определенных задач в сети БПЛА. Значение весового коэффициента необходимо для расчета общего значения параметров БПЛА.

Значения весовых коэффициентов для каждого параметра БПЛА представлены в таблице 4.1, все они задаются в процентах. На практике значения параметров будут рассчитываться как отношение значения одного параметра определенного БПЛА в данный момент времени к максимально возможному значению этого параметра. Значение параметров БПЛА также будет выражено в процентах. В данной работе при моделировании все четыре параметра задавались в диапазоне от 20 до 75%.

Таблица 4.1 – 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

Таким образом, алгоритм (последовательность действий) для сети БПЛА с интеграцией технологий SDN будет выглядеть следующим образом:

1. Формирование кластеров БПЛА с использованием алгоритма кластеризации k -средних.
2. Первоначальный выбор головного узла в каждом кластере по четырем значениям параметра БПЛА.
3. Определение области сбора информации для каждого кластера БПЛА.
4. Определение маршрута движения для каждого кластера с использованием алгоритма FOREL для сбора данных с определенных сенсорных полей. Область сбора данных выбирается как радиус кластера.
5. Для передачи данных по сети БПЛА кластеры подключаются через головной узел к ближайшему привязному БПЛА, который действует как контроллер SDN. Этот пункт необходимо повторять через регулярные промежутки времени.
6. Если уровень заряда батареи головного узла падает ниже определенного значения, необходимо выбрать новый головной узел.

4.4.3 Результаты моделирования

Данная работа была реализована в среде Matlab. В таблицах 4.2-4.4 и на рисунках 4.5 и 4.6 приведены результаты моделирования.

Таблица 4.2 – Значения параметров БПЛА

№ БПЛА	1 БПЛА группа				2 БПЛА группа			
	Батарея, %	44	38	56	57	62	60	58
СРУ, %	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 4.3 – 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 4.4 – 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

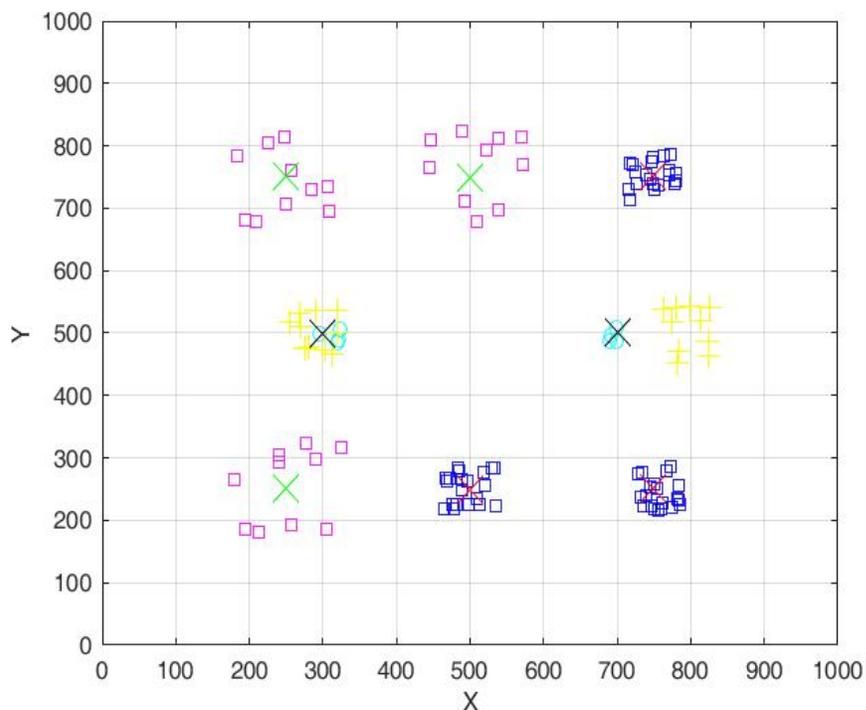


Рисунок 4.5 – Изначальная схема сети БПЛА

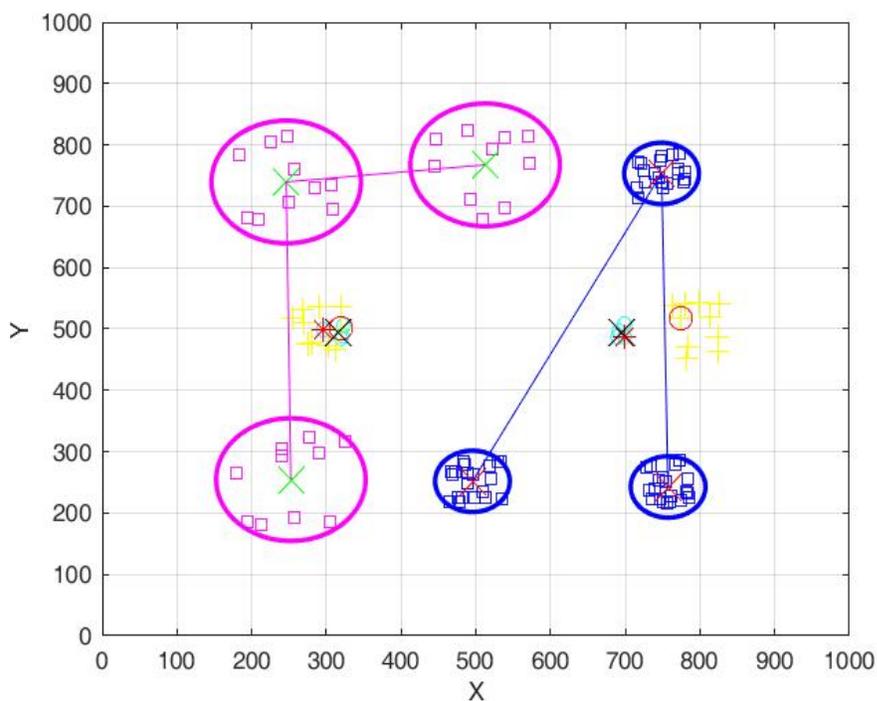


Рисунок 4.6 – Схема сети БПЛА после выполнения предлагаемого алгоритма

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

Описание отображаемых на Рисунках 4.5 и 4.6 элементов:

- 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.

4.5 Разработка метода выгрузки трафика из наземной сети на БПЛА при размещении на БПЛА узла МЕС и при использовании БПЛА в качестве ретранслятора

В этом разделе исследуется проблема летающих мобильных граничных вычислений на основе UAV-МЕС для обеспечения поддержки наземных узлов, например, IoT, которые генерируют данные по результатам измерений в окружающей среде. Устройства IoT могут решать только простые вычисления и обработку данных из-за ограниченных ресурсов [156]. В традиционных методах

вычисления реализуются путем передачи данных на центральную базовую станцию с сервером, обеспечивающим вычисления зачастую через множественные переходы и ретрансляции, что приводит к задержкам и ошибкам [157]. Для таких проблем летающие вычисления на основе UAV-MEC играют жизненно важную роль для выполнения вычислительных задач от имени устройств IoT путем выгрузки данных с узлов IoT (наземных датчиков) на ближайший летающий БПЛА [158, 159]. Кроме того, эффективное взаимодействие между БПЛА и устройствами IoT для обработки и выгрузки данных можно использовать в режиме реального времени. Таким образом, летающие вычисления на основе UAV-MEC могут сократить время задержки выполнения устройствами IoT за счет разгрузки данных для обработки (устройство IoT на ближайший БПЛА, а не устройство IoT на удаленную базовую станцию). Это продлевает жизненный цикл беспроводной сенсорной сети или сети Интернета Вещей [160]. MEC на базе БПЛА представляет собой оборудование бортовых устройств, включая память, цифровые камеры, датчики, технологии связи и исполнительные механизмы [161].

4.5.1 Мобильные граничные вычисления MEC и БПЛА

В этом подразделе представлены результаты анализа наиболее актуальных работ, в которых изучались проблемы интеграции БПЛА и MEC. В исследовании [166] решается задача минимизации суммарной мощности для сети MEC с поддержкой БПЛА. Авторы предложили алгоритм решения невыпуклой задачи минимизации степени суммы путем итеративного решения трех подзадач. Предлагается возможное решение для этого итеративного алгоритма, алгоритм

кластеризации нечетких с-средних. В [167] рассматривается децентрализованный механизм оптимизации между серверами МЕС и пользователями. Механизм назначения состоит в том, чтобы БПЛА помогали разнородным пользователям выбирать различные ресурсы МЕС в распределенной среде. Был смоделирован эффективный механизм схемы выгрузки вычислений для оптимизации цены и энергопотребления в условиях ограниченной задержки. Кроме того, в исследовании [168] изучалась стратегия кэширования и выгрузки задач для МЕС, в которой определяется, какие задачи следует кэшировать и сколько задач следует выгрузить. Предложенный алгоритм минимизирует общую энергию, потребляемую мобильными устройствами при соблюдении требований сети к задержке. Авторы в [169] предложили энергетически эффективную процедуру выгрузки вычислений для систем UAV-МЕС с акцентом на обеспечение безопасности на физическом уровне. Оптимальные результаты, обеспечиваемые сформулированными задачами, в работе определены как для активных, так и для пассивных подслушивающих устройств. Алгоритм выгрузки с учетом требуемой энергии и обеспечиваемой задержки, предложенный в [170], предлагает два метода выгрузки трафика на БПЛА. Первый метод — это выгрузка в пределах воздушной сети, при которой БПЛА может передать свои вычислительные задачи ближайшим БПЛА, имеющим доступные вычислительные и энергетические ресурсы. Вторым методом выгрузки — это наземная выгрузка, которая позволяет выгружать задачи на пограничный облачный сервер из многоуровневых граничных облачных устройств, подключенных к наземным станциям. Алгоритм выбирает исполнительное устройство и метод выгрузки на основе ограничений по задержке и энергии. Кроме того, в исследовании [171] рассматривались мобильные граничные вычисления (МЕС) с поддержкой нескольких БПЛА, которые могут быть развернуты в качестве летающей платформы МЕС для обеспечения вычислительных ресурсов для наземного пользовательского оборудования (UE). Авторы используют целочисленное нелинейное

программирование для решения двух проблем: во-первых, как добиться взаимодействия между несколькими UE и БПЛА, во-вторых, как добиться распределения ресурсов от БПЛА к UE. Кроме того, там же предложен алгоритм взаимодействия и распределения ресурсов (RLAA) на основе обучения с подкреплением (RL) для эффективного и действенного решения этой проблемы.

4.5.2. Системная модель и сценарий

Предлагаемая системная модель включает в себя набор узлов IoT (наземные сенсоры), 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. Кроме того, удаленная базовая станция также имеет граничный сервер, как это показано на Рисунке 4.7.

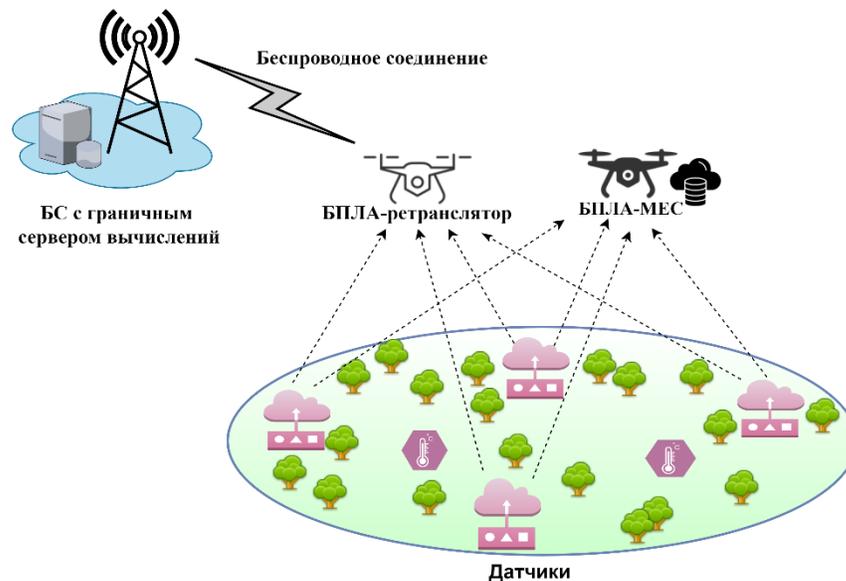


Рисунок 4.7. – Системная модель

Данные будут обрабатываться либо на ближайших узлах Интернета вещей с помощью летающего граничного вычислительного сервера UAV-МЕС, либо удаленно - на центральном граничном сервере облачных вычислений.

Первый сценарий — это летающая мобильная граничная вычислительная система, в качестве МЕС при этом используется БПЛА, куда данные будут выгружаться от узлов IoT (на ближайший БПЛА-МЕС), который оснащен вычислительными ресурсами. При этом он имеет возможность хранения, обработки и анализа данных [162, 163].

Второй сценарий представляет собой удаленную вычислительную систему, где БПЛА в качестве ретранслятора используется для передачи данных от узлов IoT на центральный граничный сервер облачных вычислений по беспроводному каналу, как это показано на рисунке 4.7.

Узлы IoT в общем случае генерируют N независимых задач вычислений, которые необходимо обработать. Для выполнения этих 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»:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{на UAV – МЕС} \\ 0 & \text{на граничном облачном сервере} \end{cases}$$

Следующее уравнение позволяет определить максимальную скорость восходящей линии, когда данные для решения задач передаются по беспроводному каналу [164]:

$$D_{IoT,UAV} = w * \log_2 \left(1 + \frac{P_{IoT,UAV} G_{IoT,UAV}}{\sigma w} \right), \quad (4.5)$$

где w представляет собой полосу пропускания канала; $G_{IoT,UAV}$ – затухание канала между узлом IoT и UAV, а также граничным сервером; $P_{IoT,UAV}$ – мощность передачи для взаимодействия между БПЛА и устройством Интернета Вещей а σ есть плотность мощности помех.

4.5.3 Вычислительная модель

В этом подразделе представлена модель выгрузки вычислений. Во-первых, узлы IoT (наземные датчики) имеют N независимых вычислительных задач, требующих выполнения. Кортеж $\{S_i, C_i, T_i^{\text{constraint}}\}$ представляет задачу, необходимую для каждой вычислительной задачи i , где S_i — размер данных, необходимых для передачи, C_i — общее количество циклов ЦП, а $T_i^{\text{constraint}}$ — крайний срок, необходимый для решения задания I , который необходимо выполнить.

А) Вычисления на БПЛА.

В случае вычислений на БПЛА, когда вычислительная задача i выгружается и обрабатывается в UAV-МЕС, узлы IoT (наземные датчики) ищут БПЛА-МЕС, чтобы проверить наличие ресурсов для выполнения задачи или нет.

Задержка передачи вычислительной задачи i от узла IoT (наземные датчики) к БПЛА- МЕС может быть выражена как:

$$T_{IoT-UAV}^{\text{trans}} = \frac{S_i}{D_{IoT}}, \quad (4.6)$$

а длительность обработки вычислений для задачи i на UAV-МЕС может быть найдена из следующего выражения:

$$T_{\text{UAV-МЕС}}^{\text{process}} = \frac{C_i}{F_{\text{UAV}}}, \quad (4.7)$$

где F_{UAV} – вычислительные возможности UAV-МЕС. Общая длительность обработки на UAV-МЕС тогда определяется как:

$$T_{\text{UAV-МЕС}}^{\text{total}} = T_{\text{IoT-UAV}}^{\text{trans}} + T_{\text{UAV-МЕС}}^{\text{process}}, \quad (4.8)$$

$$T_{\text{UAV-МЕС}}^{\text{total}} = \frac{S_i}{D_{\text{IoT}}} + \frac{C_i}{F_{\text{UAV}}}. \quad (4.9)$$

В) Граничные облачные вычисления на удаленном сервере.

В случае граничных облачных вычислений на удаленном сервере, когда вычислительная задача i узлов IoT (наземных датчиков) будет передаваться на граничный облачный сервер через БПЛА-ретранслятор и там будет обрабатываться, задержку передачи от БПЛА-ретранслятора на граничный облачный сервер вычислительной задачи i узла IoT (наземные датчики) можно выразить как:

$$T_{\text{UAV-server}}^{\text{trans}} = \frac{S_i}{D_{\text{UAV}}}. \quad (4.10)$$

Задержка передачи вычислительной задачи i от узла IoT (наземные датчики) к граничному облачному серверу может быть выражена как:

$$T_{\text{server}}^{\text{process}} = \frac{C_i}{F_{\text{server}}}, \quad (4.11)$$

где F_{server} - вычислительные возможности граничного облачного сервера.

Наконец, общая длительность передачи информации для граничного облачного сервера и длительности обработки составит на основе суммирования (4.6), (4.10) и (4.11):

$$T_{\text{server}}^{\text{total}} = T_{\text{IoT-UAV}}^{\text{trans}} + T_{\text{UAV-server}}^{\text{trans}} + T_{\text{server}}^{\text{process}}, \quad (4.12)$$

$$T_{\text{server}}^{\text{total}} = \frac{S_i}{D_{\text{IoT}}} + \frac{S_i}{D_{\text{UAV}}} + \frac{C_i}{F_{\text{server}}}. \quad (4.13)$$

Общая длительность с учетом использования летающего сегмента можно определить следующим образом:

$$T_i^{\text{total}} = \alpha_i T_{\text{UAV-MEC}}^{\text{total}} + (1 - \alpha_i) T_{\text{server}}^{\text{total}}. \quad (4.14).$$

4.5.4 Постановка задачи

В этом разделе рассматривается достижение эффективной задержки при выгрузке вычислений на основе летающей вычислительной системы.

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

$$\min \sum_{i=1}^N T_i^{\text{total}}, \quad (4.15)$$

$$T_i^{\text{total}} \leq T_i^{\text{constraint}} \quad C1$$

$$\alpha_i \in \{0,1\} \quad C2$$

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.

4.5.5 Алгоритм выгрузки

Алгоритм выгрузки для летающих вычислений в этой статье основан на «алгоритме динамического программирования, использующего расстояние Хэмминга в качестве критерия для завершения своей работы (DPH)» [165]. Алгоритм обеспечивает инклюзивный процесс поиска решений оптимальной выгрузки для летательного вычислительного комплекса. Первоначально узлы IoT (наземные датчики) разгружают задачу i на ближайший БПЛА UAV-MEC, когда $\alpha_i=1$, или на граничный облачный сервер, когда $\alpha_i=0$. 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-MEC, а какие задачи будут выполняться удаленно на граничном сервере Edge-Cloud. В таблице генерируемые случайные битовые потоки заполняются единицами (1) в горизонтальной ячейке. Нули (0s) заполняются в вертикальной ячейке. Первая

ячейка всегда пуста. Когда первый бит равен 1, то начальная ячейка имеет вид (1, 2). Когда первый бит равен 0, то начальная ячейка равна (2, 1). 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). Тогда (2, 1) — это начальная ячейка первого потока, где первый бит равен 0. С другой стороны, (1, 2) — это начальная ячейка второго потока, если первый бит равен 1. Следуя этому правилу, результирующий поток показан в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – 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. Алгоритм выгрузки вычислений, предложенный в данной диссертационной работе, приведен ниже.

Алгоритм для выгрузки трафика при использовании летающих сетей.

-
1. *Initialize Time matrixes and set the Completion deadline ($T_i^{\text{constraint}}$) and Transmission Rate*
 2. *generate a task (randomly)*
 3. *Loop iteration*
 4. *generate a random bit stream*
 5. *calculate delay for tasks of IoT nodes (ground sensors) (at UAV-MEC, at edge-cloud server)*
 6. *check the first bit to specify the starting cell in the first table*
 8. *loop i to N-1*
-

```

9. if bit(i) == 1 in the table (UAV-MEC)
10.     regenerate random bit (0 or 1)
11. end if
12. Put each bit of the bit stream in the correct position in table
13. if this specific cell in tables is visited before compare the new Total delay of this cell
    with the previous one
14.     if the new Total delay of the cell is less than the previous one
15.         Replace the total delay of this cell with the new calculated amounts.
16.         Calculate the delay of the remaining bits of the new bit stream
17.     else
18.         Keep the previous total delay in the cell.
19.         Calculate the delay of the remaining cells of the new stream based on the existing
amount of this cell
20.     end if
21. end if
22. end Loop
23. if Number of bits in tables = N & Ttotal <  $T_i^{\text{constraint}}$  & hamming distance criterion is
met
24.     return Ttotal
25. end if
26. end Loop

```

4.5.6 Результаты моделирования

Моделирование было выполнено с использованием пакета программ Matlab. Исходные данные для моделирования приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – 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

Число задач установлено равным $N = 15$, а число IoT узлов (наземных датчиков) — 5. Частоты процессоров БПЛА-МЕС и сервера граничных вычислений составляют 500 МГц и 10 ГГц соответственно. Объем данных случайным образом увеличивается с 10 до 30 мегабайт. В зависимости от расстояния скорость передачи данных также изменялась случайным образом от 3 до 9 Мбит/с, что означает, что на более коротких расстояниях достижима большая скорость передачи.

На Рисунке 4.8. 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.

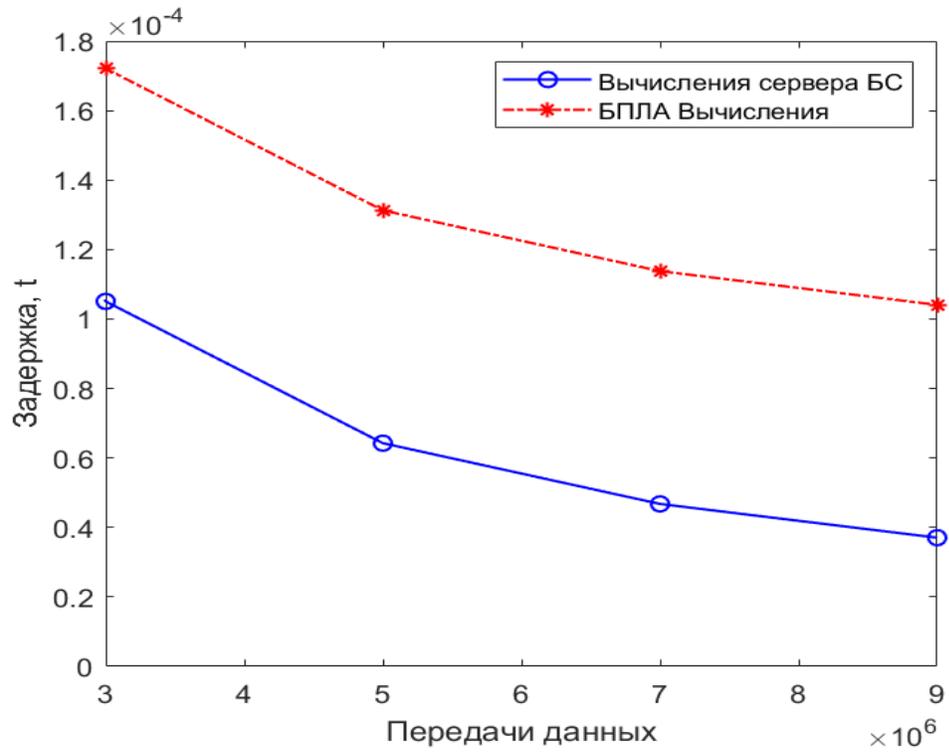


Рисунок 4.8 – Задержка в зависимости от скорости передачи данных

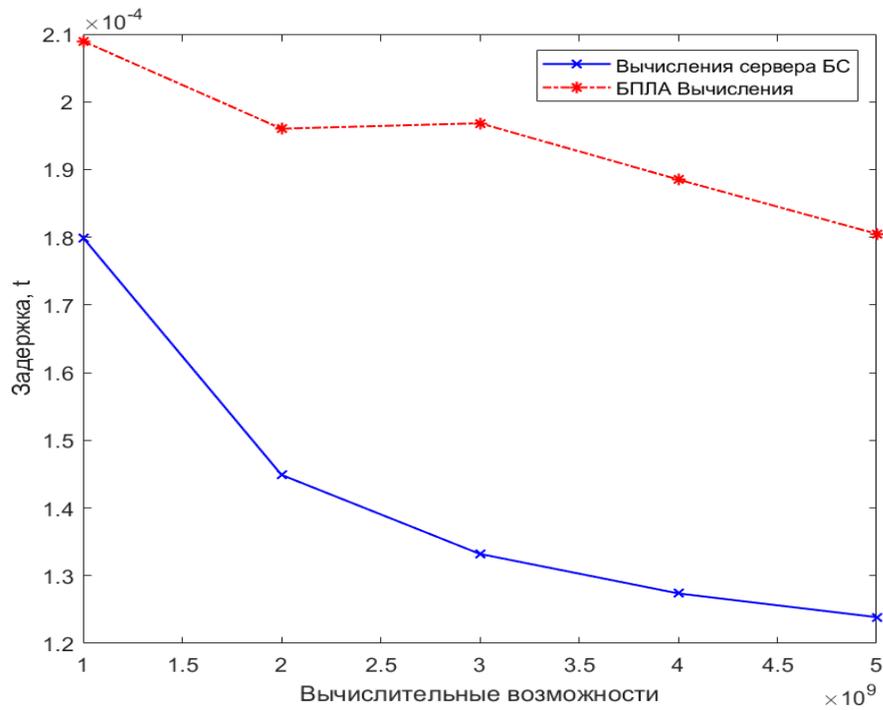


Рисунок 4.9 – Задержка в зависимости от вычислительных возможностей

На Рисунке 4.9 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 4.10 и 4.11 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 пограничном облачном сервере. Задержка в случае летающих вычислений намного выше, чем задержка в случае пограничного облачного сервера, поскольку вычислительная мощность пограничного облачного сервера намного выше, чем вычислительная мощность БПЛА-МЕС.

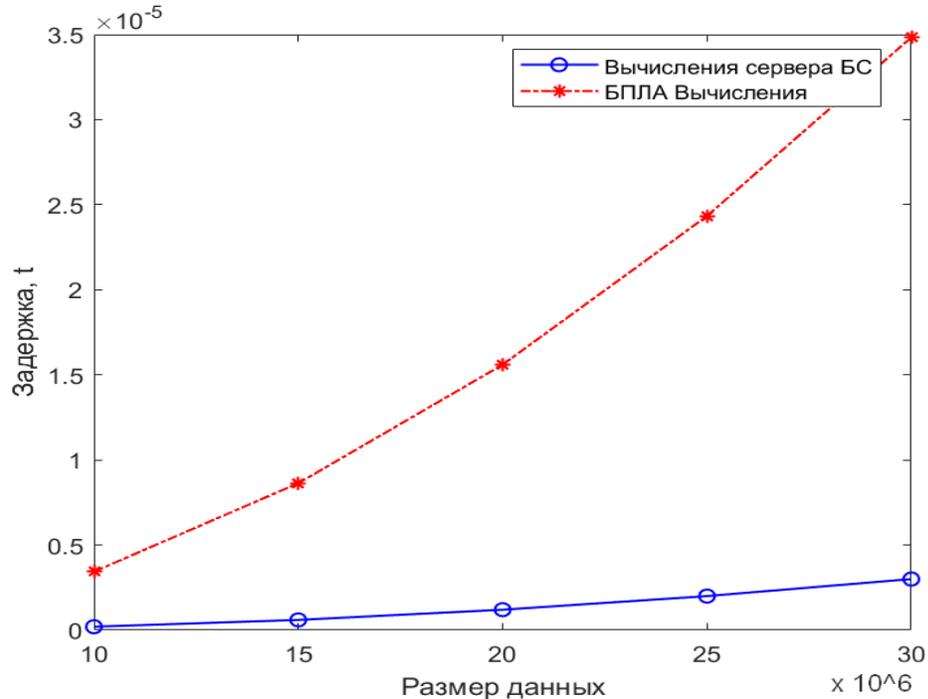


Рисунок 4.10 – Задержка в зависимости от объема данных

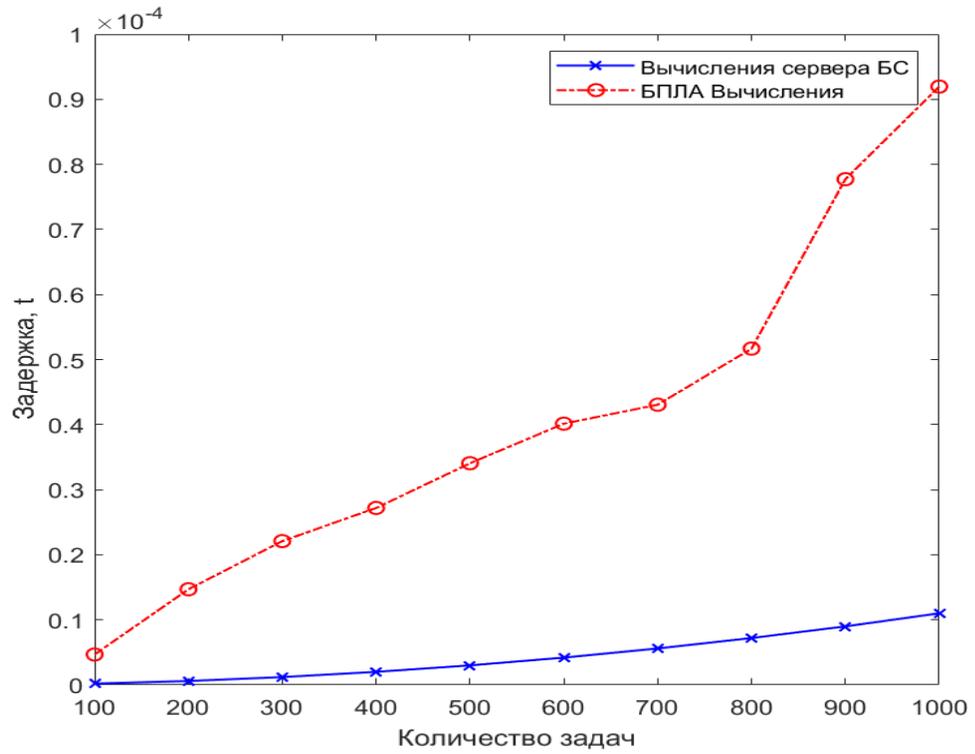


Рисунок 4.11 – Задержка в зависимости от числа задач

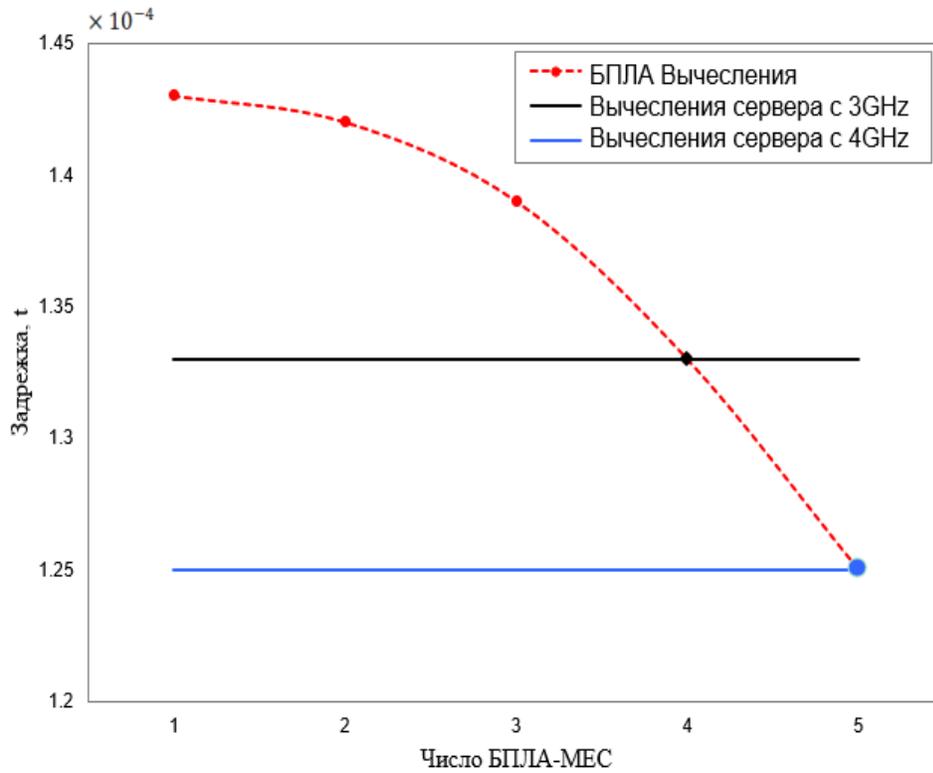


Рисунок 4.12 – Задержка в зависимости от числа БПЛА-МЕС

Соответственно, для уменьшения задержки выполнения вычислительной задачи необходимо увеличить либо вычислительную мощность БПЛА- МЕС, либо увеличить количество БПЛА- МЕС, как показано на рисунке 4.12.

4.6 Выводы

В четвертой главе были проведены исследования кластеризации сетей БПЛА при сборе информации с сенсорных полей и задержки при использовании в качестве контроллеров SDN базовых станций и/или БПЛА как для одиночных БПЛА, так и для группы БПЛА. При этом были получены следующие основные результаты:

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

2. Разработана 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. 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.

4. 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 1км на 1км.

5. 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.

6. 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.

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. На основе этого анализа были рассмотрены решения по использованию SDN в 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 ($H2H+TI$ и AR) 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Е.Кучерявый. Интернет Вещей. Электросвязь, №1, 2013, с.21-24.
2. Kirichek R. Model networks for internet of things and SDN / Kirichek R., Vladyko A., Zakharov M., Koucheryavy A. // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2016, pp. 76-79.
3. Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 44-46.
4. Кучерявый А.Е., Тактильный Интернет / Кучерявый А.Е., Выборнова А.И. // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО-2016. Том 1. С. 6-11.
5. Кучерявый А.Е. Сети связи 2030 / А.Е.Кучерявый, А.С.Бородин, Р.В.Киричек // Электросвязь. – 2018. - №11. – С.52-56.
6. А.Е.Кучерявый. Сети связи с ультра малыми задержками. Труды НИИР, 2020.
7. Р.А.Дунайцев, А.С.Бородин, А.Е.Кучерявый. Интегрированная сеть космос-воздух-земля-море как основа сетей связи шестого поколения. Электросвязь, №10, 2022, с.5-8.
8. Cui, Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G⁺ Requirements, Architectures and Challenges. China Telecommunications, 2022, v.19, issue 2, pp.90-108.
9. S. A. R. Naqvi, S. A. Hassan, H. Pervaiz, and Q. Ni, “Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 1, pp. 36–42, 2018.

10. M. Zhang, C. Su, Y. Liu, M. Hu, and Y. Zhu, "Unmanned aerial vehicle route planning in the presence of a threat environment based on a virtual globe platform," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 5, no. 10, p. 184, 2016.
11. Кучерявый А.Е. и др. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия. *Электросвязь*, №1, 2022. С-14-20.
12. Горбачева Л.С. и др. Исследование влияния характеристик сети на функционирование многофункционального робота-манипулятора. *Электросвязь*, №2, 2022, с. 37-41.
13. I. Mahmud and Y.-Z. Cho, "Adaptive Hello Interval in FANET Routing Protocols for Green UAVs," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63 004–63 015, 2019.
14. X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu, and H. Yanikomeroglu, "Airborne communication networks: A survey," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 9, pp. 1907–1926, 2018.
15. Z.Li, M.Uusitalo, H.Shariatmadari, B.Singh. 5G URLLC: Design Challenges and System Concepts. 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), October 8-9. Tokio, Japan, 2018, 6p.
16. P.Popovski and all. Wireless Access for Ultra-Reliable Low Latency Communications. *IEEE Network*, v.32, issue 2. March-April 2018, pp. 16-23.
17. J. Sánchez-García, J. M. García-Campos, S. Toral, D. Reina, and F. Barrero, "An intelligent strategy for tactical movements of UAVs in disaster scenarios," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2016, p. 18, 2016.
18. A. Korchenko and O. Illyash, "The generalized classification of unmanned air vehicles," in *Proceedings of the IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, 2013, pp. 28–34.
19. Oubbati, Omar Sami, et al. "Softwarization of UAV networks: A survey of applications and future trends." *IEEE Access* 8 (2020): 98073-98125.

20. S. Rohde and C. Wietfeld, "Interference aware positioning of aerial relays for cell overload and outage compensation," in Proceedings of the IEEE vehicular technology conference (VTC Fall). IEEE, 2012, pp. 1–5.
21. A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," in Proceedings of the IEEE global communications conference. IEEE, 2014, pp. 2898–2904.
22. H. Ahmadi, K. Katzis, and M. Z. Shakir, "A novel airborne selforganising architecture for 5G+ networks," in Proceedings of the IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2017, pp. 1–5.
23. X. Wang, L. Li, and W. Zhou, "The effect of haps unstable movement on handover performance," in Proceedings of the 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). IEEE, 2019, pp. 1–5.
24. P. Di Vito, D. Fischer, M. Spada, R. Rinaldo, and L. Duquerroy, "HAPs Operations and Service provision in Critical Scenarios," in Proceedings of the SpaceOps Conference, 2018, p. 2504.
25. J. Qiu, D. Grace, G. Ding, M. D. Zakaria, and Q. Wu, "Air-ground heterogeneous networks for 5G and beyond via integrating high and low altitude platforms," IEEE Wireless Communications, 2019.
26. X. Qi, J. Ma, D. Wu, L. Liu, and S. Hu, "A survey of routing techniques for satellite networks," Journal of communications and information networks, vol. 1, no. 4, pp. 66–85, 2016.
27. J. Zhang, S. Zhu, and C. Li, "Research on Topology Partition Algorithm of Polar Orbit Satellite Network," in Proceedings of the 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). IEEE, 2018, pp. 296–299
28. C. Wang, F. Ma, J. Yan, D. De, and S. K. Das, "Efficient aerial data collection with uav in large-scale wireless sensor networks," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 11, no. 11, p. 286080, 2015.

29. S. Y. Lien, K. C. Chen, and Y. Lin, "Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 4, pp. 66–74, Apr. 2011.
30. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," 2017, *arXiv:1703.05401*. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1703.05401>
31. S. H. Alsamhi, O. Ma, and M. S. Ansari, "Predictive estimation of the optimal signal strength from unmanned aerial vehicle over Internet of Things using ANN," 2018, *arXiv:1805.07614*. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1805.07614>
32. Alsamhi, Saeed H., et al. "Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities." *Ieee Access* 7 (2019): 128125-128152.
33. S. H. Alsamhi *et al*, "Greening Internet of Things for smart everythings with a green-environment life: A survey and future prospects," *Telecommun. Syst.*, 2019. doi: 10.1007/s11235-019-00597-1
34. S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari, and S. K. Gupta, "Collaboration of drone and Internet of public safety things in smart cities: An overview of QoS and network performance optimization," *Drones*, vol. 3, no. 1, p. 13, 2019.
35. Z. Dawy, W. Saad, A. Ghosh, J. G. Andrews, and E. Yaacoub, "Toward massive machine type cellular communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 1, pp. 120–128, Feb. 2017.
36. P. Sathyamoorthy, E. C.-H. Ngai, X. Hu, and V. C. M. Leung, "Energy efficiency as an orchestration service for mobile Internet of Things," in *Proc. IEEE 7th Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci. (CloudCom)*, Nov./Dec. 2015, pp. 155–162.
37. M. Hassanali, A. Page, T. Soyata, G. Sharma, M. Aktas, G. Mateos, B. Kantarci, and S. Andreescu, "Health monitoring and management using Internet-of-Things (IoT) sensing with cloud-based processing: Opportunities and challenges," in *Proc. IEEE Int. Conf. Services Comput. (SCC)*, Jun./Jul. 2015, pp. 285–292.

38. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7574–7589, Nov. 2017.
39. Qiu, Junfei. *Radio Resource Management for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Wireless Communications and Networking*. Diss. University of York, 2021.
40. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, June 2016.
41. W. Guo, C. Devine, and S. Wang, "Performance analysis of micro unmanned airborne communication relays for cellular networks," in *Proc. 9th Int. Symp. Commun. Syst., Netw. Digit. Sign (CSNDSP)*, July 2014, pp. 658–663.
42. P. G. Sudheesh, M. Mozaffari, M. Magarini, W. Saad, and P. Muthuchidambaranathan, "Sum Rate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1240–1243, June 2018.
43. Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and L. Hanzo, "UAV-aided two-way multi-user relaying," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 246–260, 2021.
44. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 849–852, 2020.
45. X. Xi, X. Cao, P. Yang, J. Chen, T. Q. Quek, and D. Wu, "Network resource allocation for eMBB payload and URLLC control information communication multiplexing in a multi-UAV relay network," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 3, pp. 1802–1817, 2020.
46. Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, "UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 2088–2092, 2020.

47. B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, "Secrecy performance analysis of UAV assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, pp. 7404–7415, 2020.
48. M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M.-S. Alouini, "FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 218–224, Jan. 2018.
49. M. E. Mkiramweni, C. Yang, J. Li, and W. Zhang, "A survey of game theory in unmanned aerial vehicles communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3386–3416, 2019.
50. M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, S. Andreev, N. Himayat, and Y. Koucheryavy, "Flexible and reliable UAV-assisted backhaul operation in 5G mmWave cellular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 11, pp. 2486–2496, 2018.
51. C. Wang, Y. He, F. R. Yu, Q. Chen, and L. Tang, "Integration of networking, caching and computing in wireless systems: A survey, some research issues and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 7–28, Firstquarter 2018.
52. N. Abbas, Y. Zhang, A. Taherkordi, and T. Skeie, "Mobile edge computing: A survey," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 5, no. 1, pp. 450–465, Feb. 2018.
53. S. Jeong, O. Simeone, and J. Kang, "Mobile cloud computing with a UAV-mounted cloudlet: optimal bit allocation for communication and computation," *IET Commun.*, vol. 11, no. 7, pp. 969–974, May 2017.
54. ———, "Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 2049–2063, Mar. 2018.
55. N. Zhao, F. R. Yu, L. Fan, Y. Chen, J. Tang, A. Nallanathan, and V. C. M. Leung,

“Caching unmanned aerial vehicle-enabled small-cell networks: Employing energyefficient methods that store and retrieve popular content,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 71–79, 2019.

56. J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, “Cache-enabled unmanned aerial vehicles for cooperative cognitive radio networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 155–161, 2020.

57. M. Chen, M. Mozaffari, W. Saad, C. Yin, M. Debbah, and C. S. Hong, “Caching in the sky: Proactive deployment of cache-enabled unmanned aerial vehicles for optimized quality-of-experience,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 5, pp. 1046–1061, 2017.

58. Y. Zhang, T. T. Liu, H. G. Zhang, and Y. A. Liu, “LEACH-R: LEACH relay with cache strategy for mobile robot swarms,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 406–410, 2021.

59. J. Shi, L. Zhao, X. Wang, W. Zhao, A. Hawbani, and M. Huang, “A novel deep Qlearning based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 7, pp. 4348–4358, 2021.

60. Yan, Z.; Zhang, P. and Vasilakos, A. V. A security and trust framework for virtualized networks and software-defined networking // Security and communication networks. 2016. Vol. 9. No. 16. pp. 3059–3069.

61. Коваленко В. Н., Алзагир А. А., Мутханна А. С. А. Построение сети БПЛА с поддержкой SDN/NFV технологий // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 3. С. 71–85. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-71-85

62. Li, Y. and Chen, M. Software-defined network function virtualization: A survey // *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. pp. 2542–2553.

63. Iovanna, P. SDN solutions for 5G transport networks / Iovanna, P. and Ubaldi, F. // In 2015 International Conference on Photonics in Switching (PS), pp.297-299, IEEE, September 2015.
64. Szabo, D. Towards the tactile internet: decreasing communication latency with network coding and software defined networking / Szabo, D., Gulyas, A., Fitzek, F.H. and Lucani, D.E. // In Proceedings of 21th European Wireless Conference, pp. 1-6, VDE, May 2015.
65. Jin, X. Softcell: Scalable and flexible cellular core network architecture /Jin, X., Li, L.E., Vanbever, L. and Rexford, J. // In Proceedings of the ninth ACM conference on Emerging networking experiments and technologies, pp. 163-174, ACM, December 2013.
66. Chochlidakis, G. Low latency virtual network embedding for mobile networks / Chochlidakis, G. and Friderikos, V. // In 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-6, IEEE, May 2016.
67. Wang, K. An SDN-Based Architecture for Next-Generation Wireless Networks / Wang, K., Wang, Y., Zeng, D. and Guo, S. // IEEE Wireless Communications, 24(1), pp.25-31, 2017.
68. Hernandez-Valencia, E. How will NFV/SDN transform service provider opex? / Hernandez-Valencia, E.; Izzo, S. and Polonsky, B. // IEEE Network, vol. 29, no.3, pp. 60–67, May 2015.
69. Singh, A. K. A survey and classification of controller placement problem in SDN / Singh, A. K. and Srivastava, S. // International Journal of Network Management, 2018.
70. Qiu,C. Sleeping mode of multi-controller in green software-defined networking / Qiu,C.; Zhao, C.; Xu, F. and Yang, T. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, no. 1, p. 282, Dec. 2016.

71. Yonghong, F. A dormant multi-controller model for software defined networking / Yonghong, F.; Jun, B.; Jianping, W.; Ze, C.; Ke, W. and Min, L. // China Communications, vol. 11, no. 3, pp. 45–55, Mar. 2014.

72. A. Tootoonchian, Y. Ganjali, Hyperflow: A distributed control plane for openflow, in: Proceedings of the 2010 Internet Network Management Conference on Research on Enterprise Networking, INM/WREN'10, 2010, pp. 3–3.

73. N. Gude, T. Koponen, J. Pettit, B. Pfaff, M. Casado, N. McKeown, S. Shenker, Nox: Towards an operating system for networks, SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 38 (3) (2008) 105–110. doi:10.1145/1384609.1384625. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1384609.1384625>

74. T. Koponen, M. Casado, N. Gude, J. Stribling, L. Poutievski, M. Zhu, R. Ramanathan, Y. Iwata, H. Inoue, T. Hama, S. Shenker, Onix: a distributed control platform for large-scale production networks, in: Proceedings of the 9th USENIX conference on Operating systems design and implementation, OSDI'10, 2010, pp. 1–6.

75. M. Canini, P. Kuznetsov, D. Levin, S. Schmid, Software transactional networking: Concurrent and consistent policy composition, in: Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, HotSDN '13, ACM, New York, NY, USA, 2013, pp. 1–6. doi:10.1145/2491185.2491200. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2491185.2491200>

76. A.-W. Tam, K. Xi, H. Chao, Use of devolved controllers in data center networks, in: Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2011 IEEE Conference on, 2011, pp. 596–601. doi:10.1109/INFCOMW.2011.5928883.

77. V. Yazici, O. M. Sunay, A. O. Ercan, Controlling a software-defined network via distributed controllers, in: 2012 NEM Summit Conference Proceedings, NEM Summit'12, 2012.

78. K. Phemius, M. Bouet, J. Leguay, Disco: Distributed multi-domain sdn controllers., CoRR abs/1308.6138. URL <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/corr/corr1308.html#PhemiusBL13>

79. A. A. Dixit, F. Hao, S. Mukherjee, T. Lakshman, R. Kompella, Elasticcon: an elastic distributed sdn controller, in: Proceedings of the tenth ACM/IEEE symposium on Architectures for networking and communications systems, ACM, 2014, pp. 17–28.
80. M. Bari, A. Roy, S. Chowdhury, Q. Zhang, M. Zhani, R. Ahmed, R. Boutaba, Dynamic controller provisioning in software defined networks, in: Network and Service Management (CNSM), 2013 9th International Conference on, 2013, pp. 18–25. doi:10.1109/CNSM.2013.6727805.
81. L. J. Cowen, Compact routing with minimum stretch, in: Proceedings of the Tenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA '99, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 1999, pp. 255–260. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=314500.314566>
82. X. H. Sun, D. T. Rover, Scalability of parallel algorithm machine combinations, IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.5 (6) (1994) 599–613. doi:10.1109/71.285606. URL <http://dx.doi.org/10.1109/71.285606>
83. J. Mccauley, A. P, M. Casado, T. Koponen, S. Shenker, Extending sdn to large-scale networks, in: ONS, 2013.
84. Y. Fu, J. Bi, K. Gao, Z. Chen, J. Wu, B. Hao, Orion: A hybrid hierarchical control plane of software-defined networking for large-scale networks, in: Network Protocols (ICNP), 2014 IEEE 22nd International Conference on, 2014, pp. 569–576. doi:10.1109/ICNP.2014.91.
85. M. Santos, B. Nunes, K. Obraczka, T. Turletti, B. de Oliveira, C. Margi, Decentralizing sdn's control plane, in: Local Computer Networks (LCN), 2014 IEEE 39th Conference on, 2014, pp. 402–405. doi:10.1109/LCN.2014.6925802.
86. D. Marconett, S. Yoo, Flowbroker: A software-defined network controller architecture for multi-domain brokering and reputation, Journal of Network and Systems Management 23 (2) (2015) 328–359. doi:10.1007/s10922-014-9325-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10922-014-9325-5>

87. M. Karakus, A. Durresi, A scalable inter-as qos routing architecture in software defined network (sdn), in: *Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2015 IEEE 29th International Conference on, 2015, pp. 148–154. doi:10.1109/AINA.2015.179.
88. T. Dapper, C. F. E. de Melo, P. Cumino, D. Rosário, E. Cerqueira, and E. P. de Freitas, “STFANET: SDN-based Topology Management for Flying Ad Hoc Network,” *IEEE Access*, 2019.
89. F. Al-Turjman, M. Abujubbeh, A. Malekloo, and L. Mostarda, “UAVs assessment in software-defined IoT networks: An overview,” *Computer Communications*, 2019.
90. A. Ramaprasath, A. Srinivasan, C.-H. Lung, and M. St-Hilaire, “Intelligent wireless ad hoc routing protocol and controller for UAV networks,” in *Ad Hoc Networks*. Springer, 2017, pp. 92–104.
91. W. Qi, Q. Song, X. Kong, and L. Guo, “A traffic-differentiated routing algorithm in Flying Ad Hoc Sensor Networks with SDN cluster controllers,” *Journal of the Franklin Institute*, 2017.
92. A. T. Albu-Salih, S. A. H. Seno, and S. J. Mohammed, “Dynamic Routing Method over Hybrid SDN for Flying Ad Hoc Networks,” *Baghdad Science Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 361–368, 2018.
93. G. Secinti, P. B. Darian, B. Canberk, and K. R. Chowdhury, “Resilient end-to-end connectivity for software defined unmanned aerial vehicular networks,” in *Proceedings of the IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
94. Z. Yuan, X. Huang, L. Sun, and J. Jin, “Software defined mobile sensor network for micro UAV swarm,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. IEEE, 2016, pp. 1–4.

95. H. Iqbal, J. Ma, K. Stranc, K. Palmer, and P. Benbenek, "A software defined networking architecture for aerial network optimization," in Proceedings of the IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft). IEEE, 2016, pp. 151–155.

96. R. Kirichek, A. Vladyko, A. Paramonov, and A. Koucheryavy, "Softwaredefined architecture for flying ubiquitous sensor networking," in Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2017, pp. 158–162.

97. L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2016.

98. Marchetti, N. Towards the 5th generation of wireless communication systems / N. Marchetti // icola. arXiv preprint arXiv: 2017. – ID: 1702.00370 P.1-15.

99. Navarro-Ortiz, J. A survey on 5G usage scenarios and traffic models / J. Navarro-Ortiz, Pablo Romero-Díaz, Sandra Sendra et al.) // *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2. № 1-1. – 2020. – P. 905-929.

100. Oteafy, S. M. A. Leveraging tactile Internet cognizance and operation via IoT and edge technologies. / Oteafy S.M.A., Hassanein H. S. // *Proceedings of the IEEE* 107.2. №7. 2018. – P. 364-375.

101. Yahiya, T. I., Issues and Challenges Facing Low Latency in Tactile Internet / Yahiya, Tara I., Pinar Kirci // *UKH Journal of Science and Engineering* 3.1. - № 3.- 2019. – P. 47-58.

102. Makolkina, M. Investigation of traffic pattern for the augmented reality applications / M. Makolkina, A. Koucheryavy, A. Paramonov // *International Conference on Wired/Wireless Internet Communication*. – Springer, Cham, 2017. – P.233-246.

103. Makolkina, M. The use of UAVs, SDN, and augmented reality for VANET applications / M. Makolkina, A. Paramonov, A. Vladyko et al. // *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering aiie*. – 2017. – P.364-368.

104. Iversen, V.B. *Teletraffic Engineering Handbook* / V.B. Iversen // COM Center Technical University of Denmark Building 343, DK-2800 Lyngby Tlf.: 4525 3648. www.tele.dtu.dk/teletra.

105. Paramonov, A. M2M traffic models and flow types in case of mass event detection. / A. Paramonov, A. Koucheryavy // *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. Springer, Cham. – 2014. – P.294-300

106. Koucheryavy, A. Applications of augmented reality traffic and quality requirements study and modeling / A. Koucheryavy, M. Makolkina, A. Paramonov // *International Conference on Distributed Computer and Communication Networks*. Springer, Cham. – 2016. – P.241-252.

107. Mahmood, O. A. Effect of heterogeneous traffic on quality of service in 5G network/ Mahmood O. A., Khakimov A., Paramonov A. // *International Conference on Distributed Computer and Communication Networks*. Springer, Cham. – 2019. – P.252-258.

108. Paramonov, A. M2M traffic models and flow types in case of mass event detection / A. Paramonov, A. Koucheryavy. S. Balandin, et al // *NEW2AN 2014*. LNCS. – 2014. – Vol. 8638, P. 294–300. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10353-2_25.

109. Chornaya, D. Investigation of machine-to machine traffic generated by mobile terminals / D. Chornaya, A. Paramonov, A. Koucheryavy // In: *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014*. – 2015. – P. 210–213.

110. Muthanna, A. Enabling M2M communication through MEC and SDN / A. Muthanna, A. Khakimov, A. Ateya et al. // *DCCN 2018*. CCIS, Springer. – 2018. –Vol. 919. – P. 95-105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5_9

111. Recommendation ITU-T Q.3900. Methods of testing and model network architecture for NGN technical means testing as applied to public telecommunication networks. — ITU-T, 2006. — 30 p.

112. Кучерявый, А. Е. Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. — СПб., Любавич, 2011. — 312 с.

113. Москаленко, Т. А. Обзор протоколов Интернета вещей / Т. А. Москаленко,

Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2017. — Т. 5. — № 2. — С. 1–12.

114. Воеводин, Ю. В. Обзор уникальных программно-аппаратных параметров

различных технологий Интернета вещей / Ю. В. Воеводин, Р. В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2015. — № 4. — С. 40–47.

115. Кучерявый, А. Е. Интернет вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. 2013. — № 1. — С. 21–24.

116. Киричек, Р. В. Модельные сети для Интернета вещей и программируемых

сетей / Р. В. Киричек, А. Г. Владыко, М. В. Захаров, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. — № 3. — С. 17–26.

117. Kirichek, R. Internet of things laboratory test bed / R. Kirichek, A. Koucheryavy // Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE). — 2016. — Vol. 348. — P. 485–494.

118. Пирмагомедов, Р. Я. Бактериальные наносети / Р. Я. Пирмагомедов, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2015. — № 2. — С. 5–10.

119. Глушаков, Р. И. Медицинские приложения наносетей: отдаленные перспективы / Р. И. Глушаков, Р. Я. Пирмагомедов, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // 3-й Азиатско-Тихоокеанский конгресс по военной медицине: материалы конгресса. — 2016. — С. 20–21.

120. Кучерявый, А. Е. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, М. А.

Маколкина, А. И. Парамонов, А. И. Выборнова, Р. Я. Пирмагомедов // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2016. — Т. 4. — № 3. — С. 1–14.

121. Muthanna, A. Analytical Evaluation of D2D Connectivity Potential in 5G Wireless Systems / A. Muthanna, P. Mašek, J. Hošek, R. Fujdiak, O. Hussein, A. Paramonov, A. Koucheryavy // Lecture Notes in Computer Science (LNCS). — 2016. — Vol. 9870. — P. 395–403.

122. Agiwal, M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey /M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2016. — Vol.18. — № 3. — P. 1617–1655.

123. Andrews, J. G. What will 5G be? / J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, J. C. Zhang // IEEE Journal on selected areas in communications. —2014. — Vol. 32. — № 6. — P. 1065–1082.

124. Кучерявый, А. Е. Тактильный Интернет / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Сети и линии связи: прошлое, настоящее, будущее. Научные чтения памяти А. С. Попова, посвященные Дню радио — празднику работников всех отраслей связи: сборник материалов. — 2016. — С. 142–146.

125. Кучерявый, А. Е. Тактильный интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2016. — № 1. — С. 44–46.

126. Кучерявый, А. Е. Приложения дополненной реальности в летающих сенсорных сетях / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Связь в революциях. Революции в связи. Материалы Десятых научных чтений памяти А. С. Попова, посвященных Дню радио — празднику работников всех отраслей связи: сборник. — 2017. — С. 168–171.

127. Киричек, Р. В. Метод обнаружения беспилотных летательных аппаратов на базе анализа трафика / Р. В. Киричек, А. А. Кулешов, А. Е.

Кучерявый // Труды учебных заведений связи. — 2016. — Т. 2. — № 1. — С. 77–82.

128. Ruz, Jose J. UAV Trajectory Planning for Static and Dynamic Environments [Электронный ресурс] / Jose J. Ruz, O. Arevalo, G. Pajares, J. M. de la Cruz // A. Vehicles, T. M. Lam (Ed.), ISBN: 978-953-7619-41-1, InTech. Режим доступа: http://www.intechopen.com/books/aerial_vehicles/uav_trajectory_planning_for_satic_and_dynamic_environments.

129. Sahingoz, O. K. Networking Model in Flying Ad Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges / O. K. Sahingoz // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2014. — Vol. 74. — № 1–2. — P. 513–527.

130. G. P. Fettweis, “The Tactile Internet: Applications and Challenges,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, Mar. 2014.

131. M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, “5G-Enabled Tactile Internet,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 3, pp. 460–473, Mar. 2016.

132. Шкляева, А. В. Сбор данных с наземного сегмента летающей сенсорной сети как система массового обслуживания / А. В. Шкляева, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // 2-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет вещей и 5G» (INTHITEN 2016). — СПб.: СПбГУТ, 2016. — С. 12–16.

133. Муратов, Э. М. Технология X-Ethernet с ультрамалыми задержками для сетей 5G (IMT-2020) / Э. М. Муратов, А. С. А. Мутханна, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. — СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2017. — С. 182–183.

134. P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, F. Kishino. (1994). “Augmented reality: a class of displays on the reality–virtuality continuum Proceedings the SPIE: Telemanipulator and Telepresence Technologies”. 2351 (1994), pp. 282-292

135. Шелухин, О.И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях /О.И. Шелухин. // М. «Радиотехника», 2003 г.

136. Tang S. An Analytical Traffic Flow Model for Cluster-Based Wireless Sensor Networks / Tang S. // 1st International Simposium on Wireless Pervasive Computing, 2006.

137. Кендалл, М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / А. Стьюарт. — М. : Наука, 1976. — 736 с.

138. Кучерявый, А.Е. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей / А.Е. Кучерявый, А.Г. Владыко, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 9-11.

139. Koucheryavy, A. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Vladyko, R. Kirichek // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. – P. 299-308.

140. Назаренко, А.П. Использование летающих систем Интернета Вещей до, во время и после катастрофической фазы ЧС / А.П. Назаренко, В.К. Сарьян, А.С. Лутохин // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 12-15.

141. Kirichek, R. Swarm of public unmanned aerial vehicles as a queuing network / R. Kirichek, A. Paramonov, A. Koucheryavy // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 601. – P. 111-120.

142. Dao, N. Analysis of Routes in the Network based on a Swarm of UAVS / N. Dao, A. Koucheryavy, A. Paramonov // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 376. – P. 1261-1271.

143. Футахи, А. Беспроводные сенсорные сети с мобильными временными головными узлами / А. Футахи, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2016. – № 9. – С. 48-54.

144. Katila, C.J. UAV-to-Ground Multi-Hop Communication Using Backpressure and FlashLinQ-Based Algorithms / C.J. Katila, B. Okolo, C. Buratti et al.

// Proceedings of the IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – IEEE, 2018. – P. 1179-1184.

145. 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. – DOI 10.34832/ELSV.2022.35.10.002. – EDN HKGCYR.

146. Сетевые технологии SDN – Software Defined Networking [электронный ресурс] – <https://habr.com/company/muk/blog/251959/>

147. Shakhathreh, H. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges / H. Shakhathreh, A.H. Sawalmeh, A. Al Fuqaha // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 48572-48634.

148. Коваленко, В. Н. Построение сети БПЛА с поддержкой SDN/NFV технологий / В.Н. Коваленко, А.А. Алзагир, А.С.А. Мутханна // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Том 8, № 3. – С. 71-85. – DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-3-71-85.

149. Варельджян, К.С. Оптимизация траектории движения БПЛА в летающих сенсорных сетях / К.С. Варельджян, А.И. Парамонов, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 20-25.

150. Kirichek, R. Optimization of the UAV-P's Motion Trajectory in Public Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN-P) / R. Kirichek, A. Paramonov, K. Varedzhyan // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. – P. 352 366.

151. Vishnevsky, V.M. Mathematical model of the operation of a tethered unmanned platform under wind loading / V.M. Vishnevsky, E.A. Mikhailov, D.A. Tumchenok, A.M. Shirvanyan // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2020. – Vol. 12, Issue 4. – P. 492-502.

152. Naqvi S.A.R., Hassan S.A., Pervaiz, Ni Q. Drone-Aided Communication as a Key Enabler for 5G and Resilient Public Safety Networks. IEEE Communications Magazine. 2018;56(1):36–42. DOI:10.1109/MCOM.2017.1700451

153. Zhang M., Su C., Liu Y., Hu M., Zhu Y. Unmanned Aerial Vehicle Route Planning in the Presence of a threat Environment Based on a Virtual Globe Platform. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2016;5(10):184. DOI:10.3390/ijgi5100184

154. Mahmud I., Cho Y.-Z. Adaptive Hello Interval in FANET Routing Protocols for Green UAVs. *IEEE Access*. 2019;7: 63004–63015. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2917075

155. Cao X., Yang P., Alzenad M., Xi X., Wu D., Yanikomeroglu H. Airborne Communication Networks: A Survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2018;36(9):1907–1926. DOI:10.1109/JSAC.2018.2864423

156. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Energy-Efficient Internet of Things Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017;16(11):7574–7589. DOI:10.1109/TWC.2017.2751045

157. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Almalki F.A. Survey on Collaborative Smart Drones and Internet of Things for Improving Smartness of Smart Cities. *IEEE Access*. 2019;7:128125–128152. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2934998

158. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Meng Q. Greening Internet of Things for Smart Everythings with a Green-Environment Life: A Survey and Future Prospects. 2018. DOI:10.48550/arXiv.1805.00844

159. Koucheryavy A.E., Vladyko A.G., Kirichek R.V. Flying Ubiquitous Sensor Networks – A New Application of Internet of Things. *Proceedings of the IV International Conference on Infotelecommunications in Science and Education*, 03–04 March 2015, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2015. p.17–22. (in Russ.)

160. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Gupta S.K. Collaboration of Drone and Internet of Public Safety Things in Smart Cities: An Overview of QoS and Network Performance Optimization. *Drones*. 2019;3(1):13. DOI:10.3390/drones3010013

161. Vyrelkin A., Koucheryavy A. Using of Unmanned Aerial Vehicles for Solving the Problems of the Smart City. *Telecom IT*. 2017;5(1): 105–113. (in Russ.)
162. Alzaghir A.A., Koucheryavy A.E. Offloading Traffic When Integrating UAVs and Edge Computing Systems. *SPbNTORES: Proceedings of the Annual Scientific and Technical Conference*. 2022;1(77):115-116. (in Russ.)
163. Filimonova M.I., Alzagir A.A., Muthanna A.S.A. Development of Methods of UAV Application to Ensure Stability of Communication Networks 2030. *SPbNTORES: Proceedings of the Annual Scientific and Technical Conference*. 2020;1(75):164–165. (in Russ.)
164. Alzaghir A., Koucheryavy A. Multi Task Multi-UAV Computation Offloading Enabled Mobile Edge Computing Systems. *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, DCCN, 20–24 September 2021, Moscow, Russia. Communications in Computer and Information Science*, vol.1552. Cham: Springer; 2021. DOI:10.1007/978-3-030-97110-6_1
165. Shahzad H., Szymanski T.H. A dynamic programming offloading algorithm for mobile cloud computing. *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE, 15–18 May 2016, Vancouver, Canada. IEEE*; 2016. DOI:10.1109/CCECE.2016.7726790
166. Yang, Zhaohui, et al. "Energy efficient resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing networks." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 18.9 (2019): 4576-4589.
167. Rahati-Quchani, Mahla, Saeid Abrishami, and Mehdi Feizi. "An Efficient Mechanism for Computation Offloading in Mobile-Edge Computing." *arXiv preprint arXiv:1909.06849* (2019).
168. Hao, Yixue, et al. "Energy efficient task caching and offloading for mobile edge computing." *IEEE Access* 6 (2018): 11365-11373.

169. Bai, Tong, et al. "Energy-efficient computation offloading for secure UAV-edge-computing systems." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.6 (2019): 6074-6087.

170. Ateya, Abdelhamied A. Ashraf, et al. "Energy-and latency-aware hybrid offloading algorithm for UAVs." *IEEE Access* 7 (2019): 37587-37600.

171. Wang, Liang, et al. "RL-based user association and resource allocation for multi-UAV enabled MEC." *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, 2019.

172. Kendall, D.G. (1951): Some Problems in the Theory of Queues. *J. Roy. Stat. Soc. (B)*, Vol. 13 (1951), No. 2, pp. 151-173.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

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

Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
http://sut.ru

E-mail: rector@sut.ru
ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОКТМО 40909000

28.05.2023 № *818/37*
на № _____ от _____

Утверждаю

Первый проректор-проректор по учебной
работе, к.т.н., доцент


Абилов А.В.


Г

Акт

о внедрении научных результатов, полученных Алзагиром Аббасом Али Хасаном в диссертационной работе «Исследование моделей трафика для сетей связи пятого поколения и разработка методов его обслуживания с использованием БПЛА»

Комиссия в составе декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем Д.В. Окуневой, доцента кафедры сетей связи и передачи данных Р.А. Дунайцев и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Алзагиром Аббасом Али Хасаном, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа № 22.05/307-Д, утверждена И.о. первого проректора-проректором по учебной работе С.И.Ивасишиным 01.07.2022), разделы Программы:

- Сети связи пятого поколения как база для развития сетей связи. Сверхплотные сети и сети связи с ультра малой задержкой.
- Концепции Интернета Вещей, Тактильного Интернета и Интернета Навыков.

2. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций» (Рабочая Программа № 22.05/469-Д, утверждена И.о. первого проректора-проректором по учебной работе С.И.Ивасишиным 01.07.2022), раздел Программы:

- Концепции развития сетей связи. Текущее состояние развития сетей. Прогнозы развития сетей связи.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Сети связи для цифровой экономики» (Рабочая Программа № 22.05/405-Д, утверждена И.о. первого проректора-проректором по учебной работе С.И.Ивасишиным 01.07.2022), раздел Программы:

- Тактильный Интернет, сети связи с ультра малыми задержками, сети связи 2030, децентрализация сетей связи и сокращения цифрового разрыва, искусственный интеллект в сетях связи.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Алзагиром Аббасом Али Хасаном в диссертационной работе:

1. 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. 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 1км на 1км.

3. 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.

Декан факультета ИКСС

к.т.н., доцент

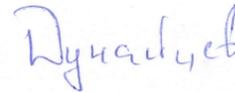
Доцент кафедры ССиПД

к.т.н., PhD

Зав. лабораторией кафедры ССиПД



Д.В. Окунева



Р.А. Дунайцев



О.И. Ворожейкина