

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи



ДИНЬ ЧЫОНГ ЗЮИ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ СЕТИ ДЛЯ ЭКСТРЕННЫХ
СЛУЖБ

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Киричек Руслан Валентинович

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
ГЛАВА 1: КОНЦЕПЦИЯ ЛЕТАЮЩИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ.....	12
1.1. Обзор летающих сетей связи.....	12
1.1.1. Беспроводные сенсорные сети.	12
1.1.2. Летающие целевые сети (FANET)	13
1.1.3. Летающая сенсорная сеть (FUSN)	14
1.1.4. Быстроразворачиваемые летающие сети	18
1.2. Анализ международной деятельности по направлению исследования	20
1.2.1. Анализ международной деятельности по исследованию методов передачи данных в летающих сетях.....	20
1.2.2. Анализ международной деятельности по поиску и спасанию людей с использованием БПЛА	22
1.3. Формирование цели и задач диссертации	27
Выводы по главе 1.....	28
ГЛАВА 2: РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БПЛА БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ СЕТИ ДЛЯ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ	29
2.1. Подходы к организации мобильных гетерогенных шлюзов на базе беспилотных летательных аппаратов	29
2.2. Исследование функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб.....	34
2.2.1. Постановка задачи.....	35
2.2.2 Описание модели.....	36
2.2.3 Анализ результатов	41
2.3. Протокол для взаимодействия между БПЛА в быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p.....	43
2.3.1 Характеристики протокола IEEE 802.11p.....	44
2.3.2 Многоканальный протокол MAC IEEE 802.11p на основе кластера (СММрР).....	47
Выводы по главе 2.....	63
ГЛАВА 3: МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ГОЛОСОВОГО ТРАФИКА ЧЕРЕЗ БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩУЮ СЕТЬ ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕТЕЙ ОПЕРАТОРОВ СВЯЗИ	65

3.1. Исследование передачи мультимедиа контента на базе беспроводной сенсорной сети	65
3.1.1. Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений ДР на базе беспроводной сенсорной сети.....	66
3.1.2 Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений дополненной реальности на базе беспроводной сети стандарта Wi-Fi (IEEE 802.11).....	73
3.2 Исследование передачи мультимедиа контента на основе технологии BLE 5.0 в ячеистой сети.....	79
3.2.1 Обзор Bluetooth Low Energy 5.0 и BLE mesh.....	80
3.2.2 Модель приложения дополненной реальности с использованием Bluetooth 5.0 Mesh	82
3.2.3 Моделирование и результаты.....	87
3.3 Метод передачи голосового трафика с использованием БПЛА в быстроразворачиваемых летающих сетях при стихийных бедствиях.....	90
3.3.1 Архитектура быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика с использованием БПЛА при стихийных бедствиях.....	91
3.3.2 Модель системы обслуживания быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика с использованием БПЛА при стихийных бедствиях	93
3.3.3 Результаты математического моделирования	97
3.4 Метод передачи голосового трафика с использованием групп БПЛА в быстроразворачиваемых летающих сетях при экстренных случаях.....	99
3.4.1 Иерархическая структура группы БПЛА в быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика при экстренных случаях....	99
3.4.2 Модель покрытия для групп БПЛА	101
3.4.3 Метод обеспечения непрерывного соединения для обеспечения гарантированной связи	105
3.4.4 Представление организации голосовых вызовов в быстроразворачиваемых летающих сетях в виде системы массового обслуживания.....	108
Выводы по главе 3.....	114
ГЛАВА 4: МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ КООРДИНАТ АБОНЕНТОВ В БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ СЕТИ ДЛЯ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ	116

4.1. Методы обнаружения координат абонентов с использованием сигналов от пользовательского оборудования сети подвижной связи.....	116
4.1.1 Метод по обнаружению координат абонентов с использованием БПЛА	117
4.1.2 Метод обнаружения с известным расстоянием до источника сигналов радиомаяков	118
4.1.3 Метод обнаружения с неизвестным расстоянием до источника сигналов радиомаяков	121
4.1.4 Определение времени поиска.....	123
4.2 Метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры с использованием группы БПЛА	125
4.2.1 Архитектура быстроразворачиваемой летающей сети для обнаружения координат абонентов при стихийных бедствиях	128
4.2.2 Метод обнаружении координат абонентов.....	130
4.2.3. Анализ полученных результатов.....	136
Выводы по главе 4.....	139
ЗАЛЮЧЕНИЕ.....	141
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Параметры имитационной модели в пакете Riverbed Modeler для реализации протокола СММрР.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы	171

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В последние годы глобальное изменение климата и экологии привело к увеличению количества и масштабов стихийных бедствий, таких как землетрясения, лесные пожары, цунами и др. Результатом практически любого стихийного бедствия, как правило, является полное или частичное разрушение телекоммуникационной инфраструктуры. В этой связи, осуществление спасательных работ весьма затруднено ввиду того, что отсутствует связь между экстренными службами, а также связь между экстренными службами с пострадавшими. При ликвидации последствий стихийных бедствий главной задачей является четкая координация действий спасательных служб. Координация возможна с помощью эффективных средств связи, которые могут функционировать в условиях разрушенной инфраструктуры. Как показала практика, быстрое развертывание таких сетей имеет основополагающее значение при ликвидации последствий и спасении жизни людей. Эффективность поисково-спасательной миссии может быть повышена за счет использования летающей сети, которая позволяет сократить время, необходимое для развертывания временной сети связи в районе стихийного бедствия, обнаружения пострадавших и уменьшить количество людей, задействованных в поисковой миссии.

Появление беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), сначала достаточно больших для решения задач военного характера, а затем и мини-, микро-БПЛА расширило область их применения и на гражданские задачи (фото/видео съемка, доставка грузов, сбор данных с удаленных объектов и др.). Кроме того, БПЛА с дополнительной аппаратурой беспроводного приема-передачи данных может рассматриваться как мобильный гетерогенный шлюз, который не только собирает данные, а выступает ретранслятором при пересылке данных, а также осуществляет взаимодействие с базовыми станциями операторов связи ввиду возможности поддерживать различные технологии передачи данных. Такой шлюз будет

выполнять роль связующего звена между абонентами (устройствами, пользовательским оборудованием сети подвижной связи и др.) и сетью связи общего пользования. Как показали результаты экспериментальных исследований, использование группы БПЛА обеспечивает лучшую эффективность работы летающих сетей, особенно в экстренных ситуациях, в которых требуется обеспечить полное радио покрытие территории в условиях отсутствия телекоммуникационной инфраструктуры.

На основании вышесказанного, исследование методов построения и функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб представляются весьма актуальным.

Степень разработанности темы. В то же время за последние годы достигнут существенный прогресс в области исследования беспроводных сенсорных сетях, летающих целевых сетях и летающих сенсорных сетях. Работы отечественных и зарубежных ученых В. М. Вишневого, А. Е. Кучерявого, К. Е. Самуйлова, В. К. Сарьяна, А. И. Парамонова, Р. В. Киричка, Е. А. Кучерявого, С. Д. Андреева, А. В. Абилова, Д. А. Молчанова, А. С. А. Мутханны, А. Г. Владыко, Д. С. Васильева, Л. Ч. Хоанг, M.S.Alouini, J.Hosek, O. K. Sahingoz, I. Bekmezci, Y. Altshuler, V. Yanovsky, P. DeLima, G. York, D. Pack, R. R. McCunea, G. R. Madey, H. Yamamoto, K. Yamasaki, T. H. Phuong, E. P. de Freitas, D. Orfanus и других позволили оценить возможности этих сетей по передаче трафика, найти новые подходы к архитектуре построения летающих сетей, определить новые направления исследований в области трехмерного пространства. Это позволило по-новому подойти к решению проблем, связанных с построением и функционированием быстроразворачиваемых летающих сетей для экстренных служб.

В представляемой работе, в отличие от известных, разрабатывается метод построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p. Такой подход позволяет реализовать прием и передачу служебных данных между БПЛА, передачу голосового трафика через

быстроразворачиваемую летающую сеть в условиях отсутствия инфраструктуры сетей операторов связи.

Объект исследования. Сеть беспилотных летательных аппаратов для экстренных служб.

Предмет исследования. Методы построения летающей сети и взаимодействия между ее узлами.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является повышение эффективности действий спасательных служб за счет использования разработанных методов построения и обеспечения функционирования летающей сети.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решаются следующие задачи:

- проанализировать принципы организации беспроводных сенсорных сетей, летающих целевых сетей, летающей сенсорной сети и их применения;
- проанализировать методы построения и функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб;
- разработать методы построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11r;
- проанализировать методы передачи мультимедиа трафика через несколько узлов на базе сетей с ячеистой топологией;
- разработать методы передачи голосового трафика через летающую сеть при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи;
- проанализировать методы определения координат абонентов в сети Wi-Fi с использованием БПЛА;
- разработать метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи с использованием летающей сети на базе группы БПЛА.

Научная новизна результатов исследования

1. Разработан метод обеспечения функционирования экстренных служб, отличающийся от известных тем, что для достижения этой цели используется быстроразворачиваемая летающая сеть на базе группы БПЛА и технологии IEEE 802.11p.

2. Разработан метод передачи голосового трафика через быстроразворачиваемую летающую сеть, отличающийся от известных тем, что для передачи голосового трафика на уровне доступа используются технологии IEEE 802.11n/ac, а на уровне распределения и ядра сети — IEEE 802.11p.

3. Разработан метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи, отличающийся от известных тем, что для этой цели используются различные геометрические фигуры группы беспилотных летательных аппаратов, а также два сценарии взаимодействия пользовательского оборудования сети подвижной связи с точками доступа, расположенными на БПЛА.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что разработана иерархическая структура сети для эффективного взаимодействия групп БПЛА быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p. На базе анализа и модификации механизмов функционирования технологии IEEE 802.11p заданы параметры, определены количественные характеристики, которые позволяют организовывать летающую ячеистую сеть для передачи голосового трафика, а также трафика от устройств интернета вещей. Разработан метод передачи голосового трафика через летающую сеть, состоящую из групп БПЛА, на базе технологии IEEE 802.11p с большой зоной радиопокрытия, при этом с возможностью масштабирования сети за счёт использования протоколов с поддержкой ячеистой топологии. Разработан метод, позволяющий обнаружить координаты абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи при различном построении элементов группы БПЛА, установлено наличие взаимосвязи между временем обнаружения координат

абонента и различным построением групповых структур БПЛА, а также разработаны различные сценарии взаимодействия пользовательского оборудования сети подвижной связи с точками доступа, расположенными на БПЛА.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования иерархической полносвязной структуры сети, которая позволяет организовать большую зону радиопокрытия в районах стихийных бедствий, для организации голосовых вызовов, локализации абонентов и сбора данных с устройств Интернета вещей, а также в возможности организации голосовой радиосвязи при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи, что значительно увеличивает зону радиопокрытия. Кроме того, предлагаемый метод обнаружения позволяет сократить время поиска координат абонента.

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

Положения, выносимые на защиту

1. Метод построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p.
2. Метод передачи голосового трафика через быстроразворачиваемую летающую сеть при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи.
3. Метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи с использованием летающей сети на базе группы БПЛА.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования, а также достаточно широким спектром публикаций и выступлений на международных и российских конференциях, на семинарах Международного союза электросвязи. Основные теоретические и практические результаты работы реализованы в учебном процессе Санкт - Петербургского государственного университета телекоммуникаций им.

проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ по курсам «Самоорганизующиеся сети» и «Интернет вещей». Кроме того, научные результаты, полученные Динь Чыонг Зюи, были использованы при подготовке вкладов СПбГУТ для 11-й Исследовательской комиссии Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации тестирования и борьба с контрафактными продуктами» в проект Рекомендации МСЭ-Т Q.ETN-DS «Архитектура сигнализации для быстроразворачиваемой сети для использования в случае стихийного бедствия».

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 18-й Международной конференции по проводным и беспроводным сетям и системам следующего поколения NEW2AN (Санкт-Петербург, 2018); на 19, 21 и 22-й Международных конференциях «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN (Москва, 2016, 2018, 2019); на 22-й Международной конференции по современным технологиям связи ICACT (Пхёнчхан, 2020); на 3-й и 4-й международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет вещей и его приложения» INTNITEN (Санкт-Петербург, 2017, 2018); на 72, 73 и 74-й конференциях Санкт-Петербургского отделения Общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова» (СПб НТОРЭС) (Санкт-Петербург, 2017–2019), на VI и VIII Международных научно-технических и научно-методических конференциях «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2017, 2019); на конференции Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ-2017): материалы молодежной научной школы (Москва, 2017), а также на заседаниях кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации по теме диссертации. Всего соискателем по теме диссертации опубликовано 19 работы, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях; 6

в изданиях, индексируемых в международных базах данных; 10 в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам п. 12, 14 паспорта специальности 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

ГЛАВА 1: КОНЦЕПЦИЯ ЛЕТАЮЩИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

1.1. Обзор летающих сетей связи

1.1.1. Беспроводные сенсорные сети

В настоящее время развитие сетей связи осуществляется на основе концепции Интернета Вещей (ИВ) [1, 2]. Технологической базой для реализации концепции ИВ являются беспроводные сенсорные сети (БСС). БСС представляют собой самоорганизующиеся сети и состоят из множества распределенных в пространстве беспроводных сенсорных узлов [3, 39]. Развитие технологий беспроводных сенсорных сетей привело к их повсеместному внедрению и появлению термина всепроникающие сенсорные сети (ВСС) (на англ. Ubiquitous Sensor Networks - USN). Дешевые и «умные» сенсоры в достаточно больших количествах объединенные в беспроводную сеть, подключенную к глобальной телекоммуникационной сети, предоставят в будущем беспрецедентные по широте услуги по контролю и управлению домами, предприятиями, автомобилями, организмами и т.п. Более того, ВСС найдут широкое применение в таких стратегически важных областях как военная стратегия, управление кризисными и чрезвычайными ситуациями, борьба с терроризмом и т.п. Сети ВСС, в зависимости от типа сенсоров, могут быть развернуты на земле, в воздухе, под и над водой, в зданиях и, наконец, на и в живых организмах, например, на и в теле человека [4]. Такие сети стали одной из основных технологических платформ для ИВ. В области новых приложений ИВ актуальность сегодня приобретает развития беспроводные сенсорных сетей на новом этапе их эволюции, разработка новых приложений, таких как летающие сенсорные сети, нано сети, тактильные Интернет, дополненная реальность и др. [40, 41].

В последние годы в исследованиях в области ВСС, одним из перспективных направлений является летающие сенсорные сети (Flying Ubiquitous Sensor Network - FUSN), в которых беспилотный летательный аппарат (БПЛА) или БПЛА общего

пользования может использоваться для сбора информации, накопленной датчиками за время их автономной работы, а также для ее доставки до сервера для дальнейшей обработки и хранения. Технология данных сетей основана на самоорганизационном объединении множества различных датчиков с низким энергопотреблением в сеть и их размещением в труднодоступных местах. Передача данных осуществляется посредством протоколов и технологий ZigBee, 6LoWPAN, LoRa [42, 72, 156].

1.1.2. Летающие целевые сети (FANET)

В конце XX века, появление БПЛА привело к новым возможностям в области сетей и систем связи, а точнее к возможности предоставления новых услуг на базе летающих целевых сетей (на англ. Flying Ad Hoc Network - FANET). FANET сеть, как правило, состоит из нескольких БПЛА, которые образуют летающий сегмент. Летающие целевые сети имеет распределенную архитектуру, которая обеспечивает связь между узлами без инфраструктуры с поддержкой самоорганизации [32]. В FANET БПЛА взаимодействуют как друг с другом, так и с наземной станцией, см. рисунок 1.1(1). За счёт группового взаимодействия сети FANET помогают улучшить недостатки одиночного использования БПЛА, например, малую площадь покрытия и ограниченное время функционирования БПЛА. Однако, в связи с тем, что одновременно в одной сети взаимодействуют несколько БПЛА приходится сталкиваться с ограничением дальности связи между БПЛА и наземной станцией. Для решения данной проблемы возможно подключать БПЛА к каналу спутниковой связи, что создаёт необходимость установки спутникового терминала на каждом БПЛА. Данная модернизация сильно влияет на увеличение стоимости содержания и обслуживания такой сети, а также сложностей эксплуатации при плохих погодных условиях, см. рисунок 1.1(2). Альтернативная архитектура сети FANET, состоящая из нескольких БПЛА и нескольких наземных станций представлена на рисунке 1.1(3). Ограничение в дальности связи решается путем организации каналов связи между БПЛА. Как видно на рисунке, в то время, как одни БПЛА связываются с наземной станцией или спутником, другие БПЛА смогут

получать данные без непосредственной связи с наземной станцией, а через связи с соседними БПЛА, см. рисунок 1.1(4).

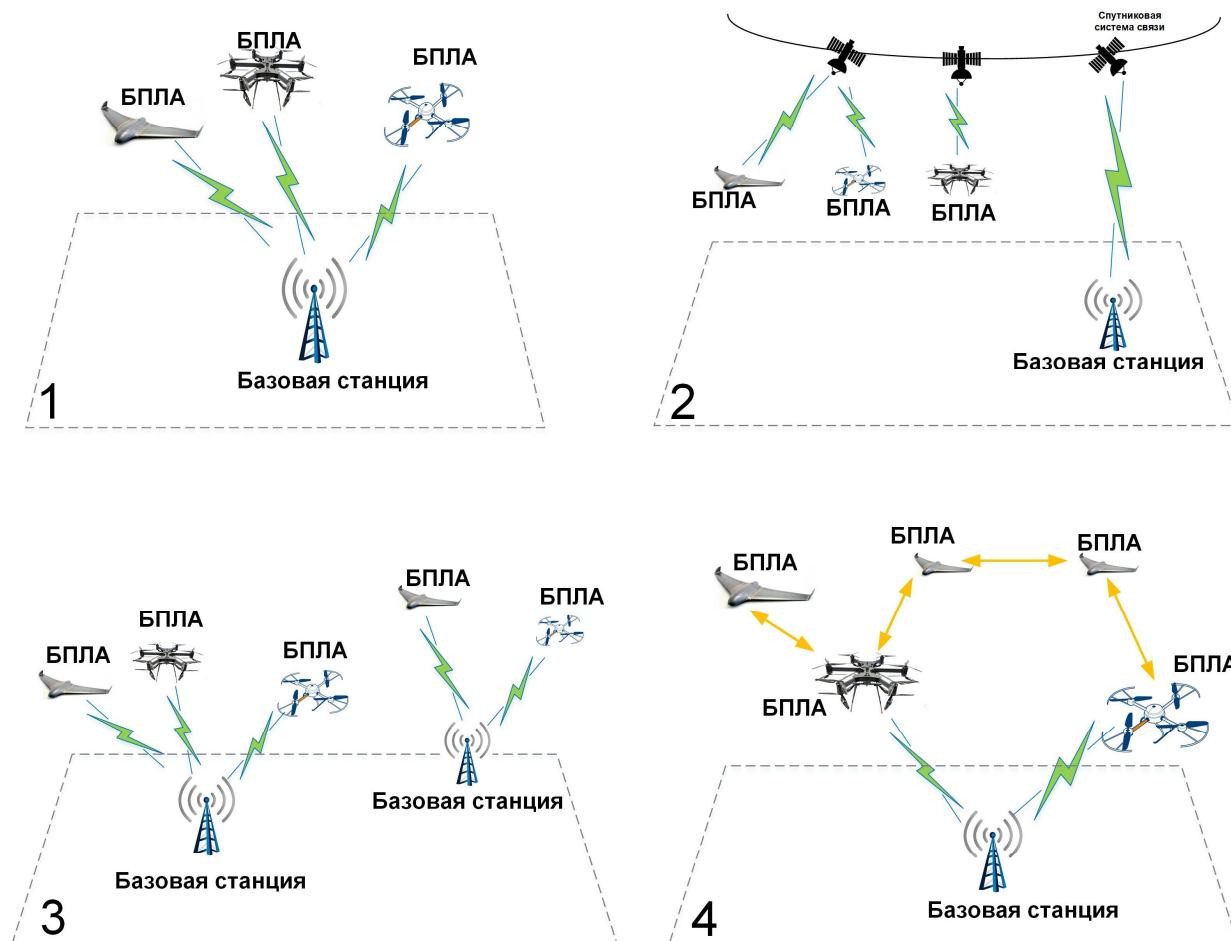


Рисунок 1.1 – Структуры сетей FANET

Создание различных архитектур взаимодействия БПЛА с наземными станциями явилось предпосылкой появления нового вида летающих сетей, в которых бы происходило взаимодействие не только между БПЛА, а также с наземными узлами. Такие сети получили название летающие сенсорные сети (на англ. Flying Ubiquitous Sensor Network - FUSN).

1.1.3. Летающая сенсорная сеть (FUSN)

Летающие сенсорные сети (ЛСС) (на англ. Flying Ubiquitous Sensor Network - FUSN) являются одним из типов БСС или ВСС [40]. В этом случае, БПЛА рассматриваются в качестве мобильных узлов ВСС, которые взаимодействуют между собой и увеличивают возможность соединения с сенсорной сетью на земле

[34]. Кроме того, БПЛА может выступать как временный головной узел кластера для наземных кластеров ВСС [35]. В общем случае, для такого вида сетей характерна неиерархическая структура с одним или множеством БПЛА. Технологии организации наземного сегмента данных сетей предполагают самоорганизационную структуру объединения множества различных датчиков с низким энергопотреблением в сеть и их размещение в труднодоступных местах [36]. Передача данных осуществляется посредством технологий и протоколов ZigBee, 6LoWPAN, LoRa и др.

ЛСС предполагает наличие два взаимодействующих между собой сегмента: летающего и наземного, см. рисунок 1.2 [5, 37-40].

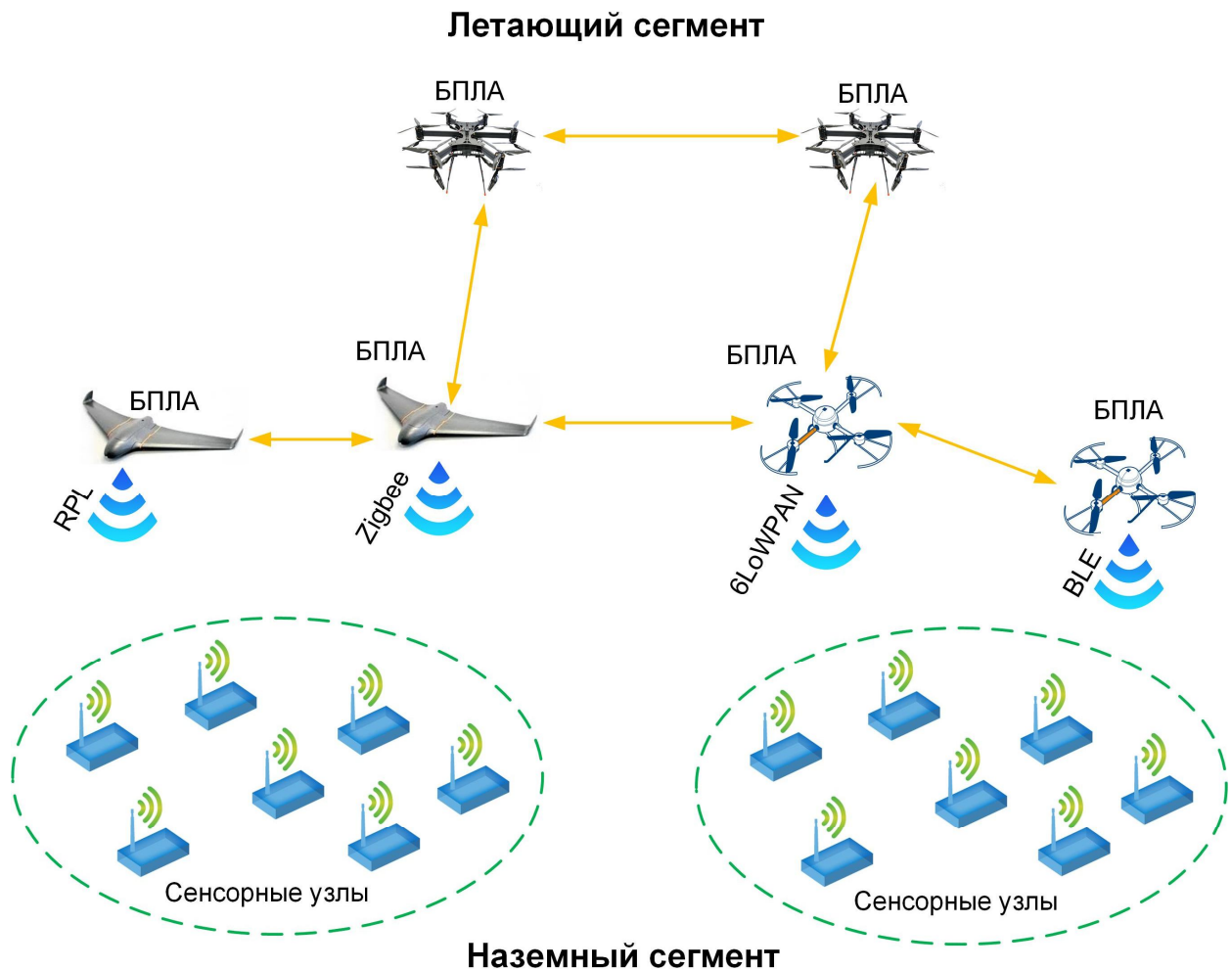


Рисунок 1.2 – Архитектура типовой летающей сенсорной сети

В летающем сегменте, может использоваться один или несколько БПЛА общего пользования. Типовой БПЛА общего пользования может быть реализован на базе различных летающих платформ. В зависимости от формы крыла и структуры фюзеляжа БПЛА могут быть классифицированы как с жестким крылом (БПЛА самолетного типа: самолет, планер, дельтаплан); с вращающимся крылом (БПЛА вертолетного типа: вертолет, мультикоптер, автожир). В роли наземного сегмента сети используются установленные на местности сенсорные узлы. БПЛА самолетного типа может использоваться в задачах случайной инсталляции беспроводных сенсорных узлов на средних и больших территориях, благодаря высокой длительности полета, максимальной высоте полета, высокой скорости, высокому показателю полезной нагрузки (возможность переносить большое количество сенсорных узлов) и возможности инсталляции с приблизительной точностью. БПЛА вертолетного типа (мультикоптер) может использоваться в детерминированной инсталляции беспроводных сенсорных узлов на узкой и средней областях, так как он имеет способность зависания в точке, а также высокую маневренность, что является полезным для более точной инсталляции сенсорных узлов в заданных целевых точках [43].

Сенсорные узлы, которые были установлены на наземном сегменте, осуществляют сбор информации и, при необходимости, управляют работой фрагмента сенсорной сети. Сенсорные узлы, как правило, работают в автономном режиме, имеют малый размер и могут долго находиться в режиме сна. Такие узлы могут собирать данные о влажности, температуре, шуме, давлении, освещенности и т. д. Сенсорные узлы образуют сенсорные поля, которые предоставляют возможность отслеживать различные физические процессы на базе датчиков. БПЛА осуществляет облет с целью сбора данных с сенсорных узлов. При непосредственном взаимодействии сенсорный узел передает накопленную информацию подлетающему БПЛА с использованием технологий и стандартов передачи данных IEEE 802.11s, IEEE 802.11r, входящих в состав стандартов IEEE 802.11 и позволяющих организовывать беспроводные иерархические Ad-Hoc-сети [33].

Отдельные сенсорные узлы могут передавать данные на БПЛА посредством технологии RFID. В качестве сенсорных узлов в этом случае используются RFID метки, которые состоят из интегральных схем, предназначенных для обработки и хранения информации, и антенны для приема и передачи сигналов. Максимальное расстояние для считывания данных может достигать до 300 м (при использовании активных RFID-меток). Связь между двумя названными сегментами поддерживается по протоколам ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL, BLE и др., см. рисунок 1.2. Следует отметить, что при объединении летающих узлов в группы для сбора информации с наземных датчиков, значительно повышается надежность сети, так как в случае выхода из строя одного из БПЛА целостность сети не нарушается и тем самым не происходит потери собранных данных. При функционировании таких сетей БПЛА летают по заранее запрограммированному маршруту, и передают полученную с сенсоров информацию на базовую станцию или сервер хранения и обработки данных по сетям подвижной связи или при помощи беспроводных технологий передачи данных IEEE 802.11p, Lora, GPRS, 3G, LTE и др., см. рисунок 1.3.

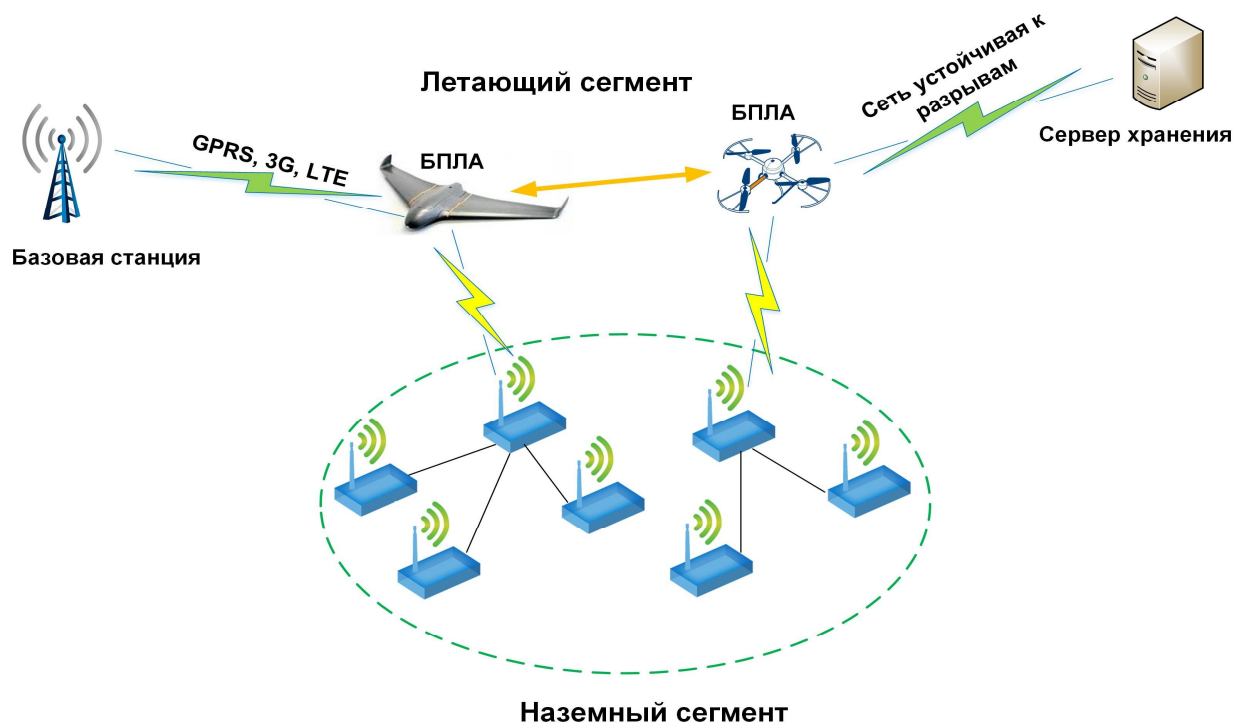


Рисунок 1.3 – Схема передачи информации в ЛСС

Как было отмечено ранее, ЛСС представляют собой один из видов БСС, поэтому архитектурно их можно разделить на одноранговые и иерархические (кластерные) сети. Учитывая то, что ЛСС состоит из двух сегментов (летающего и наземного), каждый из них может быть представлен обеими архитектурами. Одноранговыми сетями называются такие сети, которые могут спонтанно формировать новую структуру сети за счет самоорганизации узлов, что позволяет обеспечить целостность работы сети при выходе из строя какого-либо узла. Одноранговая сеть имеет ячеистую структуру. Все узлы данной сети идентичны по своим функциональным возможностям, но необходимо выбрать один центральный узел, который будет принимать, обрабатывать все данные и передавать на обработку в сеть, см. рисунок 1.4(1). Иерархической сетью принято называть сеть, которая делится на кластеры. Каждый кластер имеет маршрутизатор, выступающий в роли головного узла, и датчики, которые являются просто членами сети, см. рисунок 1.4(2).

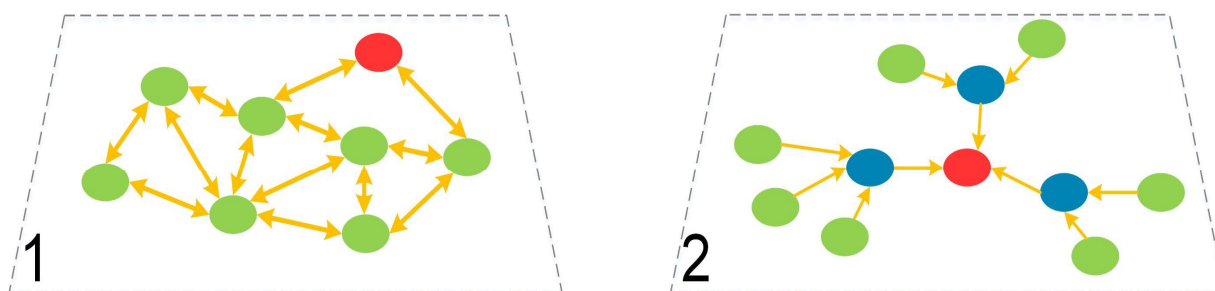


Рисунок 1.4 – Структура одноранговой сети (1) и иерархической сети (2)

1.1.4. Быстроразворачиваемые летающие сети

За последние несколько лет в различных странах мира произошло более 100 природных катаклизмов, повлекших большие разрушения и гибель людей. При ликвидации последствий главной задачей является четкая координация действий специальных служб. Координация возможна с помощью эффективных средств связи, которые могут функционировать в условиях разрушенной инфраструктуры. Как показала практика, быстрое развертывание таких сетей имеет первостепенное значение при ликвидации последствий и спасении жизни людей.

В настоящее время системы экстренной связи, используемые в случаях стихийных бедствий, основаны на спутниковой связи, например, Iridium, Globalstar, Гонец. и др. Однако в условиях перехода к сетям связи пятого поколения 5G/IMT-2020 существуют ряд технологий, которые могут сыграть важную роль в поддержке экстренных служб. Это и технологии, применяемые для организации БСС, и технологии широкополосного доступа, и технологии энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия и др.

Ввиду того, что развертывание беспроводной сети связи между специальными службами становится первоочередной задачей, необходимо, чтобы такая сеть была развернута очень быстро с использованием передовых технологий, так как в большинстве случаев счет идет на минуты. Для решения такой задачи была предложена концепция быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб (БЛСЭС) [114, 115, 131–133, 136, 139, 140]. Значительным заданием в разработке БЛСЭС явился цикл статей, посвященным ЛСС [1, 4, 13–15, 38, 40, 44, 102]. Летающая сеть – это особая разновидность самоорганизующейся сети на основе БПЛА, которая соединяется и связывается друг с другом в воздушном пространстве по беспроводным каналам и характеризуется следующими параметрами: распределенная, децентрализованная, быстроразворачиваемая, самоорганизующаяся и с возможностью восстановления.

Идеология реализации таких сетей легла в основу проекта Рекомендации МСЭ-Т Q.ETN-DS "Signalling architecture of the fast deployment emergency telecommunication network to be used in a natural disaster", которая разрабатывается в 11 Исследовательской комиссии «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации тестирования и борьба с контрафактными продуктами» сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (ИК11 МСЭ-Т) [136].

Согласно предложенной концепции, очевидно, что для взаимодействия БПЛА между собой с целью обеспечения максимального покрытия разрушенной территории необходимо организовать летающую сеть с поддержкой полносвязной топологии (Mesh-сеть). В данной сети, каждый БПЛА будет являться мобильным

гетерогенным шлюзом [103, 104, 121, 130, 141, 142]. Согласно определению, гетерогенный шлюз – это сетевое устройство или ретрансляционная система, предназначенная для обеспечения взаимодействия двух информационных сетей, которые обладают различными характеристиками, используют разные наборы протоколов и поддерживают различные технологии передачи данных [143]. Такой шлюз, может поддерживать различные технологии передачи данных такие как ZigBee, BLE, 6LoWPAN, LoRa, NB-IoT и др. выполняет роль связующего звена между устройствами и сетью связи общего пользования.

Кроме того, в условиях перехода к сетям связи пятого поколения 5G/ИМТ-2020 существует ряд технологий, которые могут сыграть важную роль в поддержке экстренных служб. Одной из основных радиотехнологий на уровне доступа, которая получила широкое распространение во всем мире, является технология беспроводных локальных сетей Wi-Fi. На каждом БПЛА предполагается установка аппаратуры, которая позволяет инкапсулировать данные от/к пользовательского оборудования сети подвижной связи с поддержкой технологии Wi-Fi (например: IEEE 802.11n/ac) в данные, передающиеся между БПЛА (например: IEEE 802.11s, IEEE 802.11p). Тем самым, становится возможным организация связи между абонентами в такой сети.

1.2. Анализ международной деятельности по направлению исследования

1.2.1. Анализ международной деятельности по исследованию методов передачи данных в летающих сетях

Исследование методов передачи данных в летающих сетях было рассмотрено во многих исследовательских работах. В статье [6] авторы обсуждали использование IEEE 802.11n и IEEE 802.15.4 для передачи данных в летающей сети с разным количеством БПЛА на базе звездообразной и ячеистой топологиях. Результаты показали, что при организации сети с топологией звезда на ее эффективность влияют высокая плотность и скорость БПЛА, которые отрицательно сказываются на скорости доставки пакетов и приводят к общей задержке. Использование топологии ячеистой сети с поддержкой стандарта

IEEE 802.11n более безопасно, чем использование топологии звезда с поддержкой аналогичных протоколов, несмотря на то, что производительность IEEE 802.15.4 была не лучшее, тем IEEE 802.11n в ячеистой топологии.

Авторы в [7] рассматривают экспериментальную оценку технологий, обеспечивающих высокую пропускную способность, таких как IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac, в сценариях с использованием экспериментов на открытом воздухе в условиях с двумя БПЛА.

Интеллектуальное сельское хозяйство является одним из наиболее перспективных приложений, для использования БПЛА. При автоматизированном обслуживании сельскохозяйственных полей могут использоваться роботизированные платформы, которые опрашивают сенсорные узлы. В работе [89] приведен эксперимент, в котором описано взаимодействие между узлами на основе IEEE 802.15.4 между БПЛА и датчиками, установленными в почве. Результаты исследований показали, что при использовании БПЛА заметно ограничивается фактическую дальность передачи IEEE 802.15.4 между БПЛА и наземными узлами примерно до 1/3 от номинальной. При опросе датчиков, расположенных на сельскохозяйственных полях за пределами прямой видимости, целесообразно применять технологии LoRa или SigFox.

В статье [8] представлена автомобильная сеть, которая взаимодействует с несколькими БПЛА. Согласно описанной схеме взаимодействия, два БПЛА обмениваются данными с тремя наземными транспортными средствами. БПЛА служит для передачи информационных сообщений для транспортных средств. Эти БПЛА могут связываться друг с другом через модули Wi-Fi (IEEE 802.11a) и ZigBee. Модули Wi-Fi предназначен для передачи изображений, а модули ZigBee - для доставки служебных сообщений. Результаты показали, что параметры взаимодействия БПЛА в воздухе (на основании измерений задержки и пропускной способности) значительно лучше, чем на участке воздух - земля, что сказывается при передаче видеоданных. Технология IEEE 802.11s используется в [9], но в рассматриваемой статье результаты ограничены маломасштабными ячеистыми сетями с одним или двумя переходами.

Кроме того, существует много исследований, посвященных созданию протоколов MAC (Medium access control) для VANET [10–12]. Рассмотренные исследования могут быть адаптированы для летающих сетей и использованы при разработке методов взаимодействия между БПЛА.

1.2.2. Анализ международной деятельности по поиску и спасанию людей с использованием БПЛА

Последние разработки в области технологий беспилотных авиационных систем (БАС) (на англ. UAS – Unmanned Aerial Systems) позволили рассматривать возможность применения недорогих БПЛА общего пользования, которые находятся в открытой розничной продаже и обладают достаточными параметрами функционирования.

Эффективность поисково-спасательной миссии может быть повышена за счет использования технологий автоматического обнаружения пострадавших, включенных в БПЛА. Летающая сеть, в которой используются технологии на основе БПЛА, позволяет сократить время, необходимое для обнаружения пострадавших, и уменьшить количество людей, необходимых для поисковой миссии [5, 13–16, 132–135].

В настоящее время рынок БПЛА растет, поскольку возможности БПЛА значительно улучшаются и позволяют рассматривать применение БПЛА в широком спектре приложений. Трудно рассмотреть все приложения. Где могут быть использованы летающие сети, поэтому, в оставшейся части этого раздела мы рассмотрим только сценарии спасения, чтобы подчеркнуть актуальность проведенного исследования.

Когда в том или ином регионе происходит стихийное бедствие, основной задачей является координация действий спасательных служб для общей эффективности. Такая координация может стать сложной задачей, если инфраструктура сети связи недоступна (например, повреждена в результате землетрясения). БПЛА могут создать временную инфраструктуру, выступая в качестве точек доступа для обеспечения беспроводной связи [17].

Использование БПЛА при осуществлении спасательной операции как правило не ограничивается запуском временной телекоммуникационной инфраструктуры. БПЛА, оснащенные датчиками, можно использовать для мониторинга загрязнения окружающей среды (например, состава газов, радиации) в определенных областях повреждения, таких как хранилище химических веществ или атомная электростанция. Информация о загрязнении может помочь спасательным командам избежать областей, угрожающих жизни и здоровью [18].

Развертывание летающей сети как правило выполняется автономно и предоставление услуг связи при стихийном бедствии нашло отражение в исследовании [19]. В этой статье алгоритм под названием «Распределенная и динамическая оптимизация роя частиц для сетей БПЛА» (на англ. Distributed and dynamic Particle Swarm Optimization for UAV networks - dPSO-U) был представлен с двумя основными целями: исследование территории бедствия и обеспечение взаимодействия между БПЛА и несколькими группами пострадавших, обнаруженными на этапе обследования. Для оценки алгоритма авторы сопоставили его с другими алгоритмами путем моделирования и получили положительные результаты.

Стоит также отметить, что БПЛА, оснащенные видеокамерами, могут помочь оценить последствия стихийного бедствия и обеспечить видеонаблюдение в реальном времени для спасательных команд. Встроенная обработка видео в режиме реального времени может помочь определить наиболее подверженные воздействию области и оценить, нуждается ли кто-либо в помощи [18, 20]. БПЛА также могут помочь спасательным командам добраться до определенного места, путем обнаружения наиболее оптимальных маршрутов следования в условиях блокировки дорог и подступов к району стихийного бедствия.

Наряду с традиционными функциями видеонаблюдения и обеспечения связи, БПЛА могут быть использованы для быстрой доставки необходимых предметов для спасательных команд (например, продуктов питания, медикаментов, медицинского оборудования) в районах с разрушенной инфраструктурой [21, 22].

Другой сценарий, который следует рассмотреть в отношении использования БПЛА - это поиск и спасение пострадавшего человека (или группы людей) в лесу. Отличительной чертой этого сценария является огромный размер территории поиска и относительно небольшое количество объектов (пострадавших людей). Как было упомянуто в [23], выживаемость человека выше, когда его обнаруживают в течение 24 часов. Таким образом, цель команды спасателей - как можно быстрее проверить наиболее обширную территорию и найти пострадавшего. Беспилотники могут повысить эффективность этого поиска, используя компьютерное зрение для обнаружения целей с воздуха.

Для повышения эффективности обнаружения пострадавших в [24] было предложено расширить поиск в видимом спектре с помощью инфракрасного зондирования.

Беспилотные летательные аппараты, оснащенные видеокамерами, используются также для поддержки спасательных операций с использованием распознавания изображений для обнаружения пострадавших. Тем не менее, существует множество случаев, когда пострадавшие находятся вне зоны визуальной видимости (например, снежная лавина) или находятся в лесу под деревьями, что делает методы компьютерного зрения почти бесполезными.

Для обнаружения пострадавших без методов видеоаналитики можно использовать беспроводное обнаружение сигналов. Многие специализированные беспроводные маяки позволяют спасателям находить пострадавших. Эти маяки широко используются людьми, чья деятельность тесно связана с рисками, такими как туристы и альпинисты. Такие категории людей подготовлены к обстоятельствам, и заранее используют специализированные маяки, предполагая, что когда-нибудь их придется спасти. Тем не менее, обычные люди также могут оказаться в чрезвычайной ситуации. Эти люди обычно не готовы к таким ситуациям и, таким образом, подходы, в которых обнаружение людей, использующих популярные персональные беспроводные устройства (например, смартфоны, умные часы) в качестве маяков, очень актуальны [25].

БПЛА, оснащенный мобильной базовой станцией или программно-определяемой радиосистемой, могут значительно сократить время обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи, если в зоне поиска отсутствует зона покрытия традиционных операторов связи. Опционально для обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи с помощью БПЛА возможно использовать технологии Wi-Fi или Bluetooth [26]. Кроме того, если MAC-адреса беспроводных интерфейсов известны, обнаружение пользователя может выполняться более эффективно [27].

Пример, описанный в [28], показывает, что распределение ресурсов является критической проблемой при использовании БПЛА при поиске в лесу. Для решения задачи оптимизации ресурсов целесообразно рассмотреть методы использования БПЛА для обнаружения сигналов от беспроводных устройств. При этом необходимо учитывать широкий диапазон параметров, включая количество используемых БПЛА, емкость батареи БПЛА, зону покрытия, мобильность цели, область поиска.

Проблема зоны покрытия была частично решена в [29] путем разработки методики проектирования беспроводной сети. Вопросы мобильности узлов, оптимального маршрута БПЛА и использования батареи рассматриваются в [30].

В работе [157] представлена система мониторинга из нескольких БПЛА для обнаружения деятельности человека в областях охраны окружающей среды. В частности, в данном исследовании разработана архитектура, ориентированная на БПЛА для задач мониторинга с поддержкой алгоритмов обработки изображений в БПЛА, который использует нейронную сеть SSD (Single Shot Multibox Detector) для задач обнаружения. Кроме того, была определена методология захвата изображений с БПЛА, были смоделированы различные сценарии распространения радиосигналов, для определения максимального расстояния между компонентами системы. Нейронная сеть была протестирована с использованием реального набора данных, предоставленного IDEMA (Institute of Sustainable Development and Environment of Rio Grande do Norte). Моделирование доказало, что модуль XBee S3 (Zigbee) допускает передачу данных на расстояние до 6 км между узлами без

ущерба для производительности системы. Создание областей пересечения между изображениями, полученными с помощью БПЛА, повышает надежность системы, поскольку эти области проверяются дважды. Нейронная сеть SSD показала удовлетворительные результаты, в основном, когда разрешение изображения составляло 300x300 пикселей с 20% точностью.

Соответствующие статьи, в которых используются БПЛА для поиска сигналов с пользовательским оборудованием сети подвижной связи пострадавшего представлены в исследованиях, таких как [26, 31].

Авторы [26] предложили систему под названием Krypto, которая решала задачи максимизации размера области поиска и минимизации ошибок определения местоположения при различных сценариях. В этой статье, однако, авторы не рассматривали типы роя БПЛА, а также влияние ошибки измерения расстояния и количества принятых сигналов. Кроме того, рассматриваемая область была небольшой по сравнению с потенциально целевой областью. Характерных для зон стихийных бедствий.

В [31] авторы использовали БПЛА для отслеживания пользовательских оборудований сети подвижной связи (смартфоны или смарт-часы), принадлежащих пострадавшим, а также получения сигналов и местоположения с помощью неглубокого алгоритма Q-обучения. Однако, в этой статье рассмотрели только один БПЛА для поисково-спасательной операции в здании.

Из соответствующих работ видно, что с использованием БПЛА эффективность поисково-спасательной операций повышается. Обнаружение пострадавших в этих случаях является одной из критических проблем. На основании вышеупомянутых исследований, используя группы БПЛА, мы рассматриваем возможность определять местонахождение и обеспечивать связь для пострадавших в условиях разрушенной инфраструктуры операторов связи или отсутствия зоны радиопокрытия вышек сети подвижной связи.

1.3. Формирование цели и задач диссертации

После анализа содержания концепции беспроводных сенсорных сетей, летающих целевых сетей, летающих сенсорных сетей и их применения был рассмотрен обзор термина быстроразворачиваемая летающая сеть, чтобы осветить проблематику и подчеркнуть актуальность проводимого исследования. Проанализированы исследования методов передачи данных в летающих сетях, а также исследования по поиску и спасанию с использованием БПЛА. Целью диссертации является «повышение эффективности действий спасательных служб за счет использования разработанных методов построения и обеспечения функционирования летающей сети». Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие задачи:

- проанализировать принципы организации беспроводных сенсорных сетей, летающих целевых сетей, летающей сенсорной сети и их применения;
- проанализировать методы построения и функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб;
- разработать методы построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p;
- проанализировать методы передачи мультимедиа трафика через несколько узлов на базе сетей с ячеистой топологией;
- разработать методы передачи голосового трафика через летающую сеть при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи;
- проанализировать методы определения координат абонентов в сети Wi-Fi с использованием БПЛА;
- разработать метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи с использованием летающей сети на базе группы БПЛА.

Выводы по главе 1

В главе 1 были рассмотрены основные понятия, архитектура и характеристики беспроводных сенсорных сетей, летающих целевых сетей, а также летающих сенсорных сетей. Были исследованы быстроразворачиваемые летающие сети. В качестве летающих узлов используются БПЛА или группы БПЛА, которые являются мобильными гетерогенными шлюзами. Такие шлюзы выполняют роль связующих звеньев между устройствами и сетью связи общего пользования, а также являются важными элементами в операциях поиска и спасения. После анализа международной деятельности по данным направлениям, были сформулированы задачи, которые предполагается последовательно решить в ходе диссертационной работы.

ГЛАВА 2: РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БПЛА БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ СЕТИ ДЛЯ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ

2.1. Подходы к организации мобильных гетерогенных шлюзов на базе беспилотных летательных аппаратов

В последние годы исследования в области всепроникающей сенсорной сети постепенно переходят от изучения характеристик на плоскости к моделям в трехмерном пространстве – это летающие сенсорные сети [1, 37, 51]. Летающая сенсорная сеть – строится на базе общедоступных БПЛА, которые применяются для сбора данных с сенсорных полей и доставки этих данных в сеть связи общего пользования [52]. Летающая сенсорная сеть предполагается два сегмента: наземный и летающий. В качестве летающих узлов используются БПЛА. В настоящее время, БПЛА стали применяться во многих сферах жизнедеятельности, как-то: мониторинг удаленных, труднодоступных или опасных объектов; картографирования; презентации, реклама, развлечения; ретрансляция сигналов; управление поведением живых объектов; доставка грузов и т.д. [137].

Согласно прогнозам МСЭ, в 2020 году начнется повсеместная эксплуатация сетей пятого поколения 5G/IMT-2020 [45, 46]. В рамках концепции 5G, см. рисунок 2.1, предполагается беспроводная связь между устройствами Интернета вещей, взаимодействующими на базе различных технологий. Для обеспечения такой связности необходимо полное покрытие участков местности с большим количеством устройств [46].

Для достижения этих целей и вместе с развитием технологий электропитания, БПЛА сможет работать до 2-3 часов [47], в этой связи, предполагается использовать БПЛА с шлюзом на борту как мобильный гетерогенный шлюз, который может поддерживать многие технологии передачи данных. Такой шлюз будет выполнять роль связующего звена между абонентами

(устройствами, пользовательским оборудованием сети подвижной связи и др.) и сетью связи общего пользования.

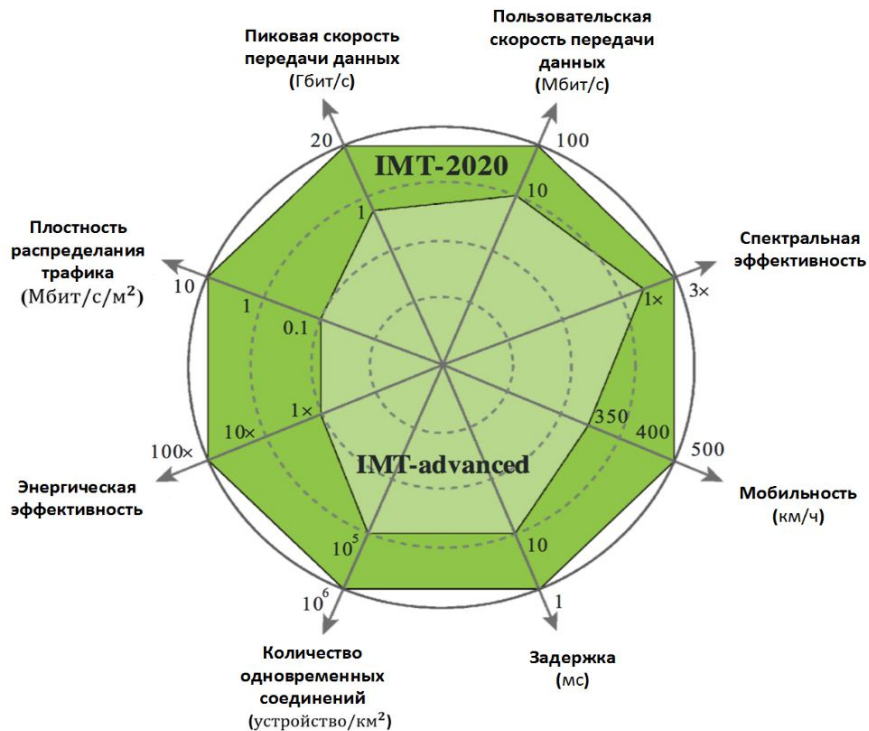


Рисунок 2.1 – Ключевые параметры для 5G

В Интернете вещей, устройство - это часть оборудования с обязательными возможностями связи и дополнительными возможностями считывания, активации, сбора, хранения и обработки данных. Шлюз – блок в Интернете вещей, который соединяет устройства с сетями связи, выполняет необходимый перевод между протоколами, используемыми в сетях связи, и протоколами, используемыми устройствами. Сервис – набор функций и возможностей, предлагаемых пользователю провайдером.

Согласно с вышеописанными задачами, для БПЛА со шлюзом на борту, предполагается два подхода к организации мобильных гетерогенных шлюзов на базе беспилотных летательных аппаратов: Первый подход – для неподвижной наземной сети с сенсорными узлами и второй подход – для подвижной наземной сети с мобильными устройствами.

Подход для неподвижной наземной сети с сенсорными узлами используется в случае что, когда БПЛА собирает данные с сенсорного поля далеко от базовых

станций и обеспечивают канал связи с ССОП, см. рисунок 2.2. Однако, в этом подходе, возможны следующие проблемы. Во-первых, необходимо рассчитать каким образом будут выбираться технологии передачи и протоколы, в зависимости от достаточной энергии аккумулятора у БПЛА. Во-вторых, БПЛА после сбора данных возвращается обратно на станцию подзарядки и передачи данных в ССОП. На его место прилетает новый БПЛА и в момент смены необходимо рассчитывать хэндовер [48]. В данном подходе, большинство БПЛА собирают только данные поэтому время хэндовера не так строго и стоит рассмотреть такую структуру сети, как DTN — сеть устойчивая к задержкам (DTN) [49].

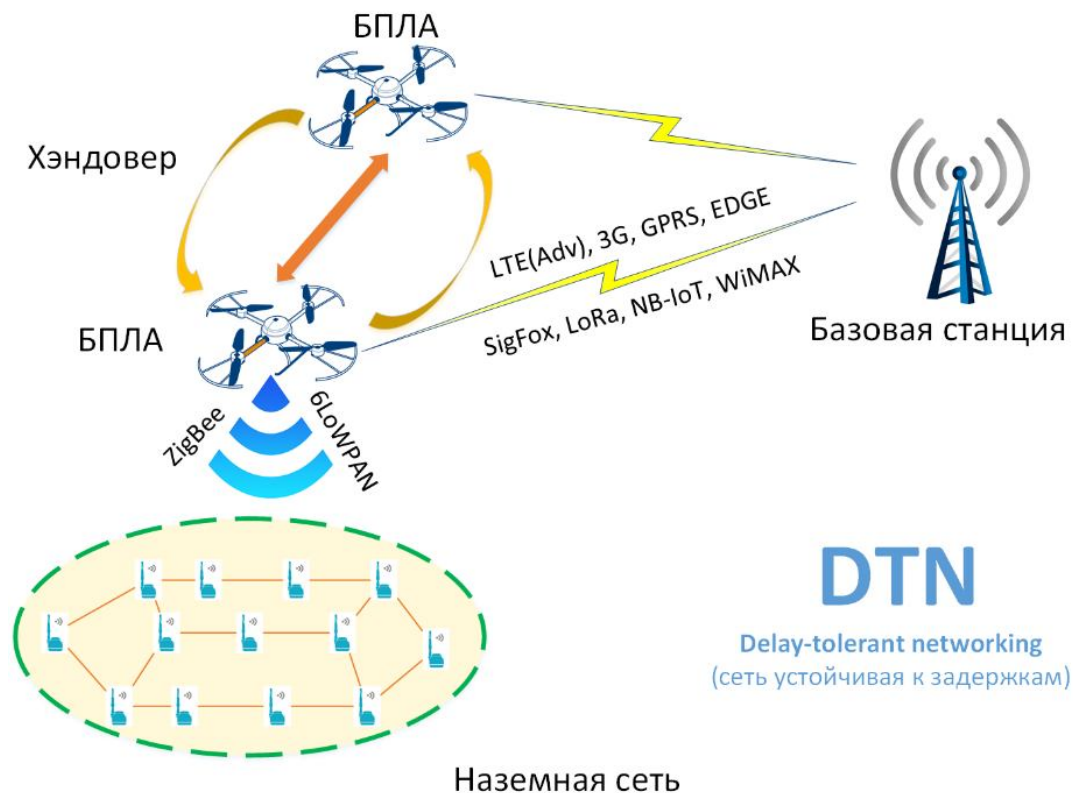


Рисунок 2.2 – Подход для неподвижной наземной сети с сенсорными узлами

Если в определенном месте большое скопление людей и у каждого есть пользовательское оборудование сети подвижной связи, планшет, ноутбук и т.д., всем необходим высокоскоростной доступ в Интернет. Допустим базовая станция рядом не может обслужить всех абонентов, поэтому подход для подвижной наземной сети с мобильными устройствами предполагает присутствие БПЛА как

временной базовой станции (см. рисунок 2.3). В этом походе, абоненты потребляют большой обмен сетевого трафика, поэтому должны быть обеспечены оптимальные параметры качества обслуживания.

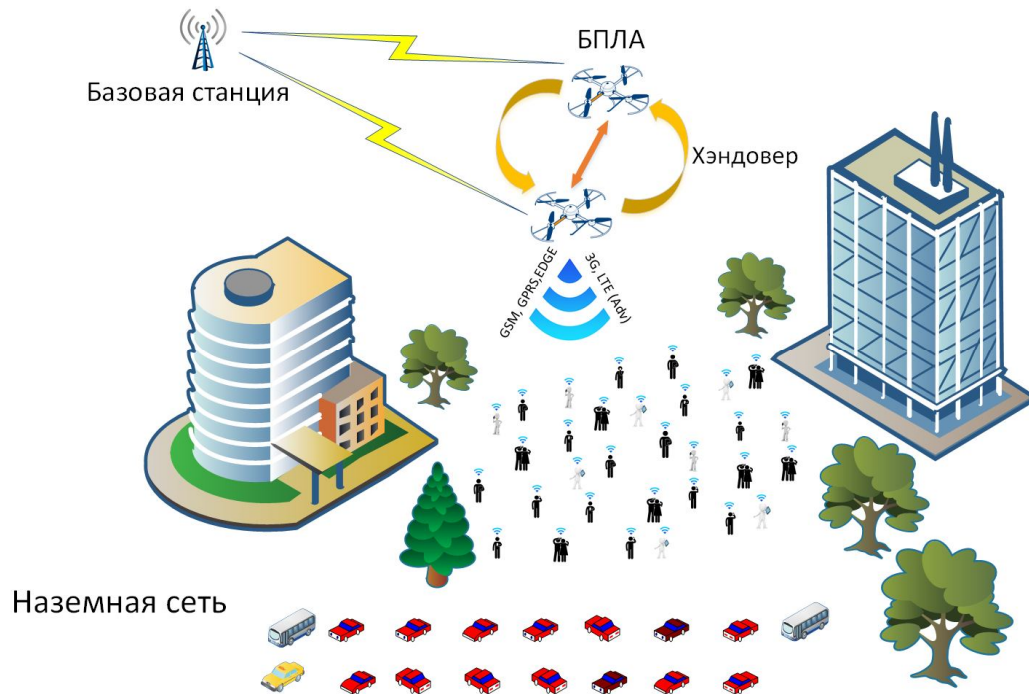


Рисунок 2.3 – Подход для подвижной наземной сети с мобильными устройствами

Аналогично как в первом подходе, возможно возникновение некоторых проблем. Во-первых, необходимо рассчитать каким образом будут выбираться технологии передачи и протоколы.

В таблице 2.1 рассматриваются технологии связи, которые могут быть реализованы на базе летающего гетерогенного шлюза. В настоящий момент, не существует технологий беспроводной высокоскоростной передачи данных. Для этого будут использоваться технологии 5G, которые обеспечат скорость передачи до 10 Гбит/с. Во-вторых, когда базовая станция находится очень далеко от наземной сети, а нам необходимо передать данные - каждый дополнительный элемент вносит задержку. Чтобы избежать этого необходимо разработать модель системы массового обслуживания и провести расчеты. Во-третьих, у БПЛА есть аккумулятор, который разряжается, когда он летит обратно на базу. В этот момент связь разрывается и критичным является то, что абоненты не должны потерять связь, они должны продолжать разговаривать и время хэндовера очень строгое.

Таблица 2.1 – Сравнения различных технологий передачи данных

	LTE (Adv)	3G (UMTS)	EDGE	GPRS	SigFox	LoRa	NB-IoT	WiMAX (802.16m)
Мак. скорость передачи данных	1 Гбит/с	384 кбит/с	217,6 кбит/с	53,6 кбит/с	100 кбит/с	50 кбит/с	250 кбит/с	350 Мбит/с
Диапазон покрытия	100 км	100 км	100 км	35 км	50 км	15 км	35 км	50 км
Пропускная способность	100 МГц	5 МГц	200 кГц	200 кГц	100 Гц	125 кГц	180 кГц	40 МГц
Задержка	5 мс	150 мс	710 мс	320 мс	секунд	-	-	10 мс
Энергопотребление	1 день	1 день	1 день	1 день	10 лет	10 лет	10 лет	7 день

2.2. Исследование функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб

При разработке БЛСЭС целесообразно рассмотреть сценарии, которые будут реализованы при использовании данной сети. Предполагается, что после стихийного бедствия большая часть телекоммуникационной инфраструктуры разрушена, поэтому насущно необходимо оценить последствия и масштаб разрушений [53]. Для этого необходимо считать данные с сенсорных узлов, расположенных в зоне разрушений. Ввиду того, что сенсорные узлы могут осуществлять связь с использованием различных технологий целесообразно для сбора данных использовать гетерогенный шлюз [104, 130]. Такой шлюз, закрепленный на БПЛА, позволит осуществить сбор данных с сенсорных узлов и их доставку в сеть связи общего пользования. На рисунке 2.4 представлена архитектура организации БЛСЭС, в которой в качестве летающего сегмента предполагается использование одного или нескольких БПЛА. Как показано на рисунке, связь между БПЛА может быть реализована на базе стандарта IEEE 802.11s или IEEE 802.11p, что позволяет организовать иерархическую беспроводную Ad-hoc сеть с мобильными узлами.

Как показал обзор научных исследований по данному направлению, в работах [54, 55] предложено использовать иерархическую модель, в которой гетерогенный шлюз на БПЛА используется для обеспечения доступа сенсорных узлов (наземный сегмент) в ССОП через спутниковый канал связи. В работе [56] рассматривается шлюз, состоящий из модуля Wi-Fi и модуля Sparrow Dongle (IEEE 802.15.4). В данной работе предложен подход с описанием принципов взаимодействия, однако не приведены результаты исследований. В статье [57], представлены результаты разработки модели беспроводной ячеистой сети (IEEE 802.11s) на базе группы БПЛА с гетерогенным шлюзом на борту. Разработанная модель не описывает принципов взаимодействия с беспроводной сенсорной сетью и использовании соответствующих протоколов для таких сетей. Стоит отметить работу [58], в которой представлены результаты разработки

шлюза, состоящего из модуля Wi-Fi и модуля LoRa. В статье не рассмотрена возможность использования шлюза на БПЛА для сбора данных с сенсорных сетей. Таким образом, можно сделать вывод, что в рассмотренных работах не приводятся результаты исследований летающих гетерогенных шлюзов в зависимости от параметров движения БПЛА, взаимодействия с другими узлами и связи с базовой станцией.

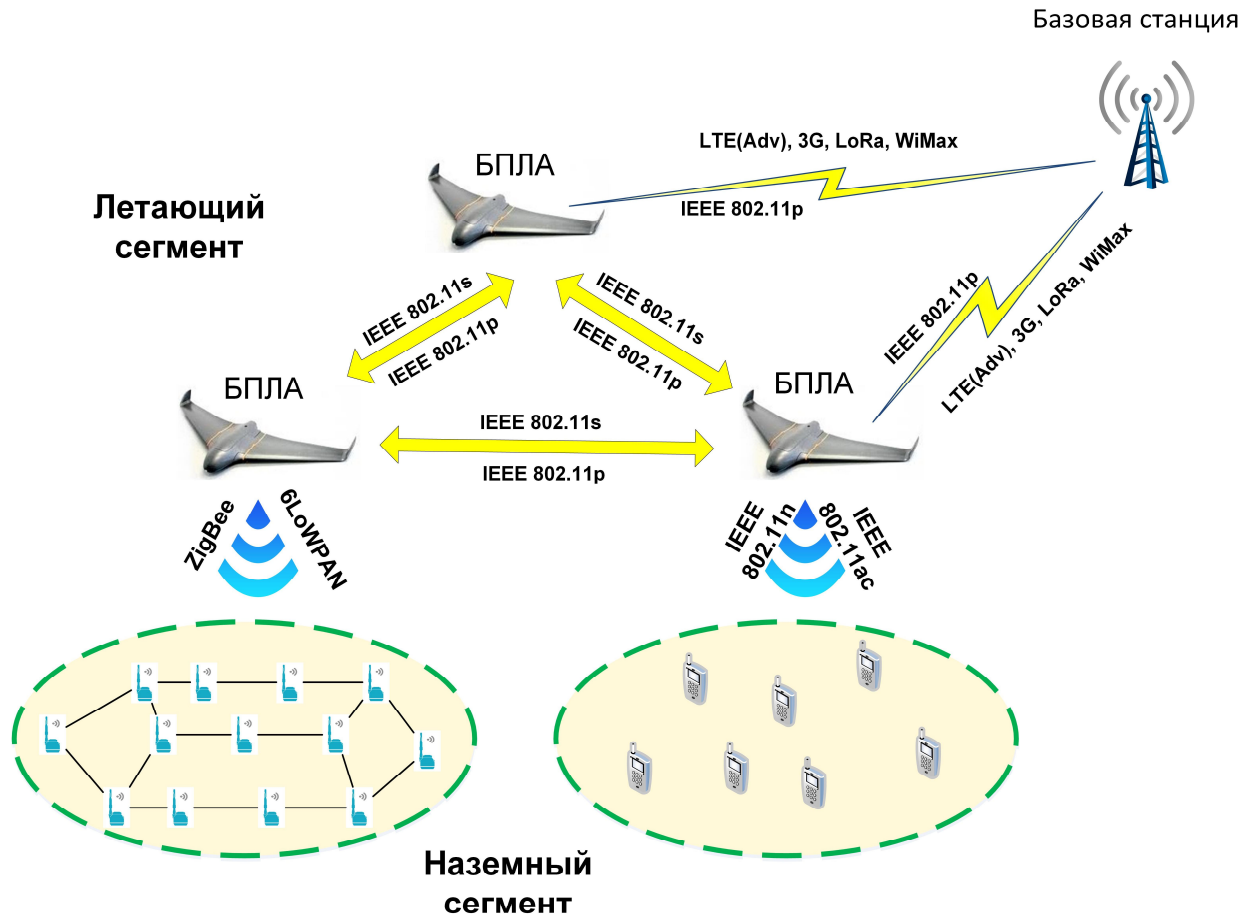


Рисунок 2.4. – Структура быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб

2.2.1. Постановка задачи

Беспилотные летательные аппараты могут быть представлены двумя типами: вертолетным и самолетным [59]. Мы рассматриваем БПЛА самолетного типа, ввиду того, что существующие на сегодняшний день образцы имеют высокую длительность полета, скорость и большую грузоподъемность. Гетерогенный шлюз поддерживает технологии 6LoWPAN и LoRa.

Рассмотрим два сценария взаимодействия узлов с координатором сети:

- Одноранговая сеть (см. рисунок 2.5): все сенсорные узлы равнозначны, во время облета заданной территории БПЛА отправляет служебные широковещательные сообщения, которые переводят сенсорные узлы из состояния «сна» в активный режим. После этого сенсорные узлы начинают отправку данных на координатор сети.

- Иерархическая сеть (см. рисунок 2.6): наземный сегмент представлен в виде иерархической сети, состоящий из сенсорных узлов и узлов-маршрутизаторов. Сенсорные узлы отправляют данные на маршрутизаторы, который выполняет их агрегацию и последующую отправку на координатор, расположенный на БПЛА.

После сбора данных в гетерогенном шлюзе производится предварительная обработка данных и инкапсуляция для последующей отправки в сеть связи общего пользования с помощью LoRa [131, 156]. Передача может осуществляться не в режиме реального времени, поэтому данный сегмент рассматривается как сеть устойчивая к задержкам [49].

При данном сценарии, целесообразно рассматривать следующие задачи:

- при какой скорости движения БПЛА гетерогенный шлюз (координатор) успеет отправить команды Multicast (MCAST) для пробуждения сенсорных узлов. При этом сенсорные узлы должны успеть передать данные на гетерогенный шлюз (координатор), с последующей передачей данных на базовую станцию. На основании результатов необходимо сделать вывод о сценарии, при котором будет обеспечена доставка данных на удаленный сервер.

2.2.2 Описание модели

Для решения вышеописанной задачи была разработана модель фрагмента летающей сети и проведены компьютерные эксперименты. В данной модели БПЛА осуществляет пролет с разной скоростью над местностью, где произвольно расположены сенсорные узлы, осуществляющие передачу данных на базе технологии 6LoWPAN. Как говорилось ранее, после получения данных гетерогенный шлюз на БПЛА производит обработку и отправку данных на базовую

станцию с помощью технологии LoRa. Для решения задачи сбора данных может быть использован подход, в котором БПЛА рассматривается как система массового обслуживания [13, 14, 102].

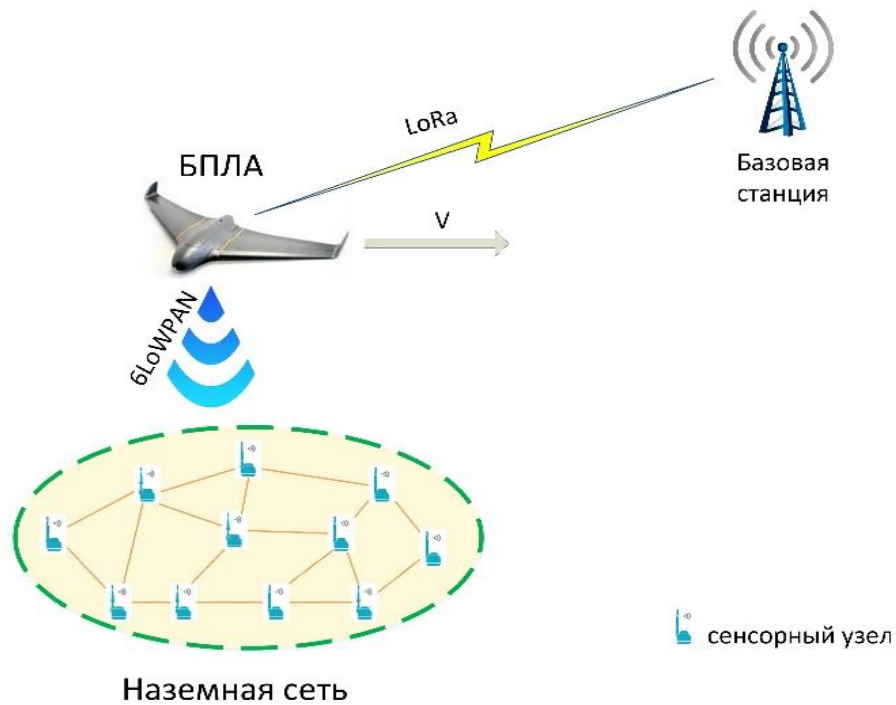


Рисунок 2.5 – БПЛА осуществляет сбор данных с одноранговой сети

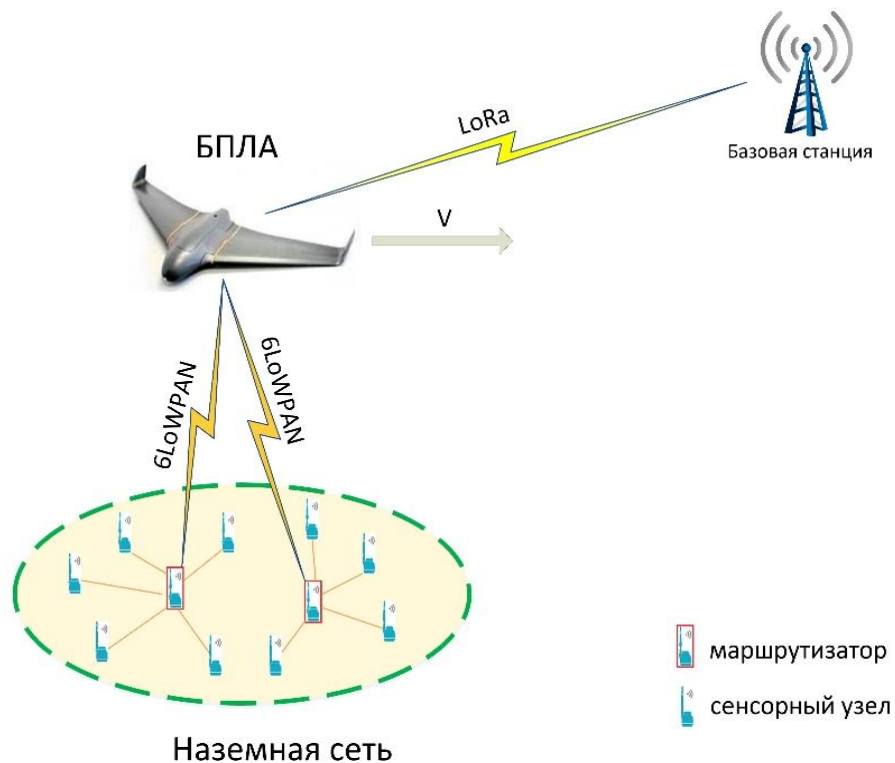


Рисунок 2.6 – БПЛА осуществляет сбор данных с иерархической сети

Координаты сенсорных узлов неизвестны, поэтому на вход системы поступает случайный поток заявок, у которого свойства определяются свойствами сенсорного поля, радиусом обслуживания БПЛА и скоростью его движения. Предполагается что, БПЛА движется прямолинейно с постоянной скоростью (v), радиусом обслуживания БПЛА (R), который представляет собой широкий диапазон работы 6LoWPAN и количество заявок от сенсорного поля является органичным. Количество заявок от сенсорного поля, которое БПЛА может принимать, зависит от времени обмена данными, которое считается по формулу (2.1):

$$t_{об} = \frac{d}{v}, \quad (2.1)$$

где $t_{об}$ — продолжительность взаимодействия с одним узлом (с)

d ($d \leq 2R$) – диапазон обмена данными: расстояние, в котором БПЛА может принимать данные от одного узла (м).

v – скорость движения БПЛА (м/с)

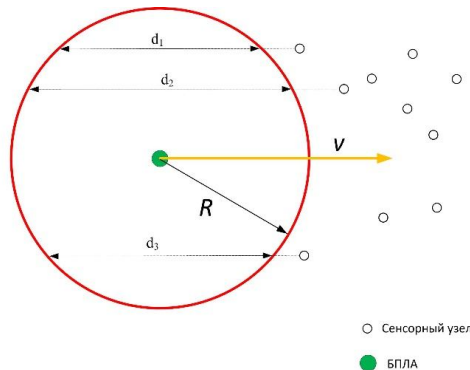


Рисунок 2.7 – Представление области обмена данными (d_i)

Чтобы вычислить время обмена данными при известной скорости движения БПЛА необходимо рассчитать расстояние d , которое может быть вычислено с помощью метода circle line picking [105] (см. рисунок 2.7).

Функция плотности вероятности единичного круга рассчитывается в формулу (2.2):

$$P_s = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2} \cdot s\right)^2}}, \quad (2.2)$$

где s — расстояние между любыми двумя точками на круге.

Функция распределения единичного круга рассчитывается в формулу (2.3):

$$F(s) = \int P_s \cdot ds = \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{s}{2}\right) + c, \quad (2.3)$$

где c — постоянное число

Для вычисления обратной функции распределения единичного круга, найдем расстояние d , которое считается по формуле (2.4):

$$d = 2R \cdot \left(\frac{\pi}{2} \cdot F(s)\right), \quad (2.4)$$

где R — радиус обслуживания БПЛА.

Имитационная модель была разработана в пакете Anylogic с использованием дискретно-событийного подхода. Параметры имитационных моделей представлены в таблице 2.2. На рисунках 2.8 и 2.9 представлены два рассматриваемых сценарии:

В первом сценарии (модель А) предполагается, что БПЛА движется прямолинейно с постоянной скоростью на высоте 100 м и осуществляет сбор данных с сенсорных узлов. Все сенсорные узлы первоначально находятся в режиме сна и начинают отправку данных к БПЛА, только когда получают сообщение Multicast от БПЛА.

Во второй сценарии (модель Б) предполагается, что на наземном сегменте все сенсорные узлы отправляют данные в близлежащие маршрутизаторы. БПЛА движется прямолинейно с постоянной скоростью на высоте 100 м. Все маршрутизаторы первоначально находятся в режиме сна и начинают отправку данных к БПЛА, только когда получают сообщение Multicast от БПЛА.

БПЛА имеет ограниченный диапазон обмена данными, поэтому если узлы находятся вне области обмена данными (другими словами время передачи от узла к БПЛА больше, чем время обмена данными ($t > t_{об}$)), то происходит потеря данных. Шлюз можно рассматривать как СМО с потерями. Буфер на шлюзе считается неорганичным.

Таблица 2.2 – Параметры имитационных моделей

Параметры	Значение
Количество пакетов входа	450
Размер пакета 6LoWPAN (бит)	1024
Размер пакета LoRa (бит)	720
Скорость передачи данных технологии 6LoWPAN (бит/с)	250000
Скорость передачи данных технологии LoRa (бит/с)	50000
Скорость движения БПЛА (м/с)	2.8; 5.6; 11.2; 16.7
Период передачи сообщения Multicast (с)	2; 5
Радиус обслуживания БПЛА, R (м)	10, 25, 50

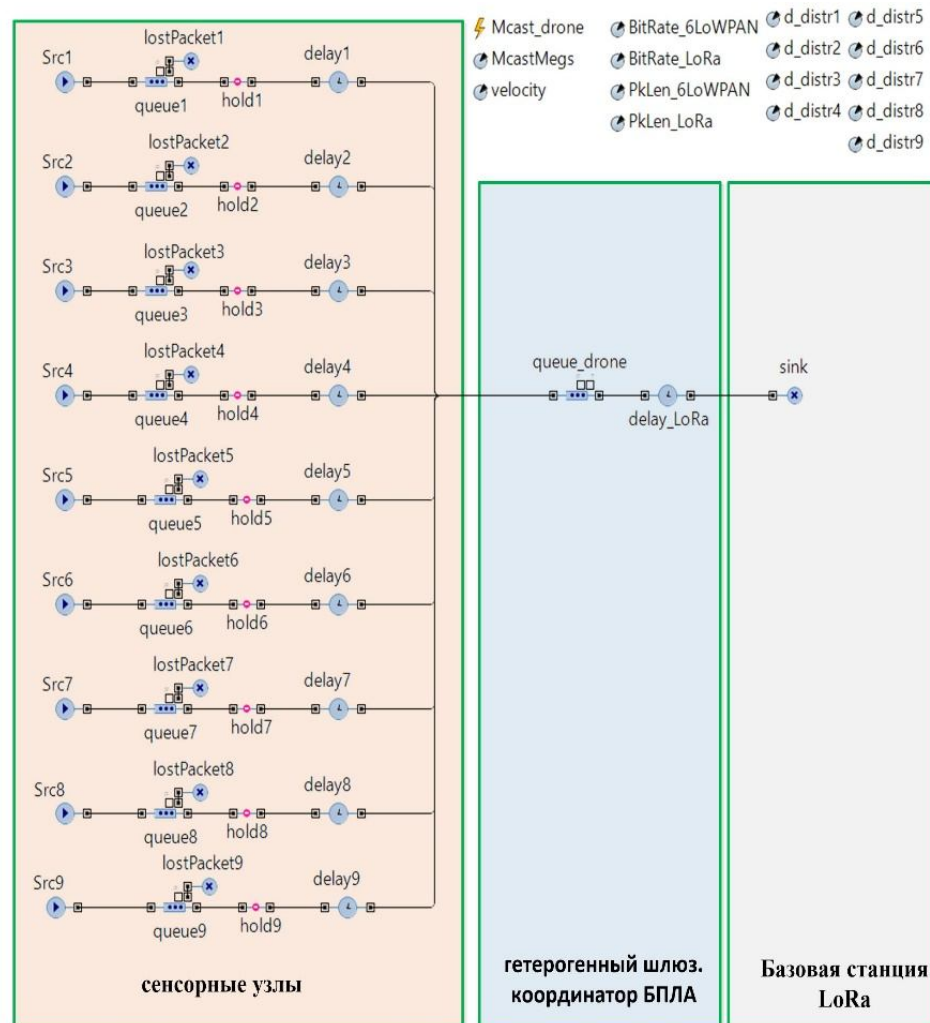


Рисунок 2.8 – Имитационная модель одноранговой сети (модель А)

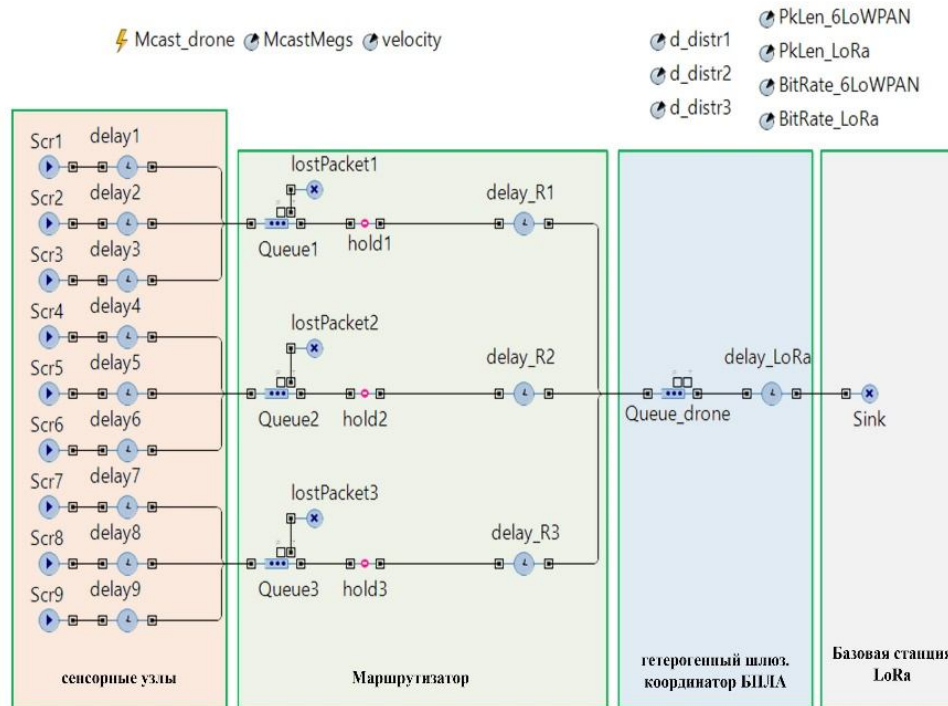


Рисунок 2.9 – Имитационная модель иерархической сети (модель Б)

В данной работе, предполагается БПЛА двигаться с разными скоростями: 2.8, 5.6, 11.2 и 16.7 м/с (соответствует примерно 10, 20, 40 и 60 км/ч). Рассматриваются разные периоды передачи сообщений Multicast: 2 и 5 а также разные радиусы обслуживания БПЛА (R): 10, 25, 50 м.

2.2.3 Анализ результатов

Результаты исследований показывают, что когда БПЛА движется с разными скоростями и радиусы обслуживания сенсорных узлов (R) 50, 25 и 10 м, то процент полученных пакетов на БПЛА для модели Б больше, чем для модели А (см. рисунки 2.10, 2.11, 2.12). На базе этого можно сделать вывод, что наиболее предпочтительно использование кластерной структуры (когда применяются маршрутизаторы для сбора данных от сенсорных узлов), чем модели, когда каждый узел осуществляет отправку данных к гетерогенному шлюзу (координатору). Как результат, если скорость движения БПЛА увеличивается, то количество принятых пакетов уменьшается, что обосновывается уменьшением времени обслуживания сенсорных узлов или маршрутизаторов.

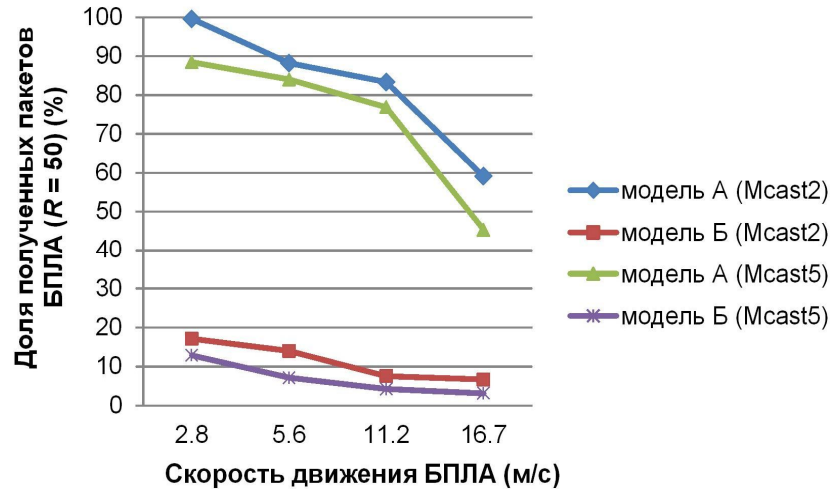


Рисунок 2.10 – Процент полученных пакетов на БПЛА при $R = 50\text{m}$

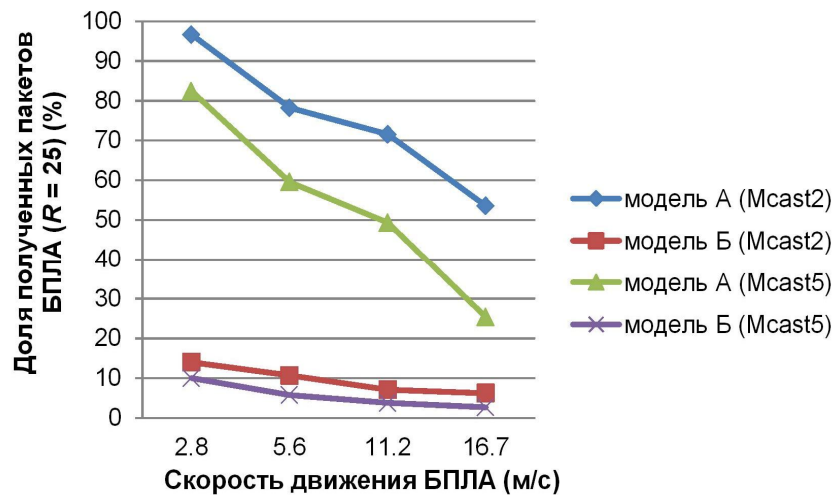


Рисунок 2.11 – Процент полученных пакетов на БПЛА при $R = 25\text{m}$

Когда скорость движения БПЛА увеличивается, вероятность потерь значительно возрастает. Если период передачи сообщения Multicast увеличивается, то количество полученных пакетов БПЛА также уменьшается, потому что время обслуживания сенсорных узлов ограничено. Это задано логикой работы модели, т.к. сенсорные узлы осуществляют отправку данных к БПЛА только тогда, когда получают сообщения Multicast.

На рисунке 2.13 представлены результаты исследования, когда сеть имеет иерархическую структуру, а период передачи сообщения Multicast равен 2 с. Таким образом, получается, что если радиус обслуживания БПЛА увеличивается, то

количество полученных пакетов тоже увеличивается. Ввиду того, что доставка на участке «гетерогенный шлюз – базовая станция» рассматривалась согласно принципам, характерных для сетей устойчивых к задержкам, во всех экспериментах была обеспечена полнота всех отправленных и принятых данных.

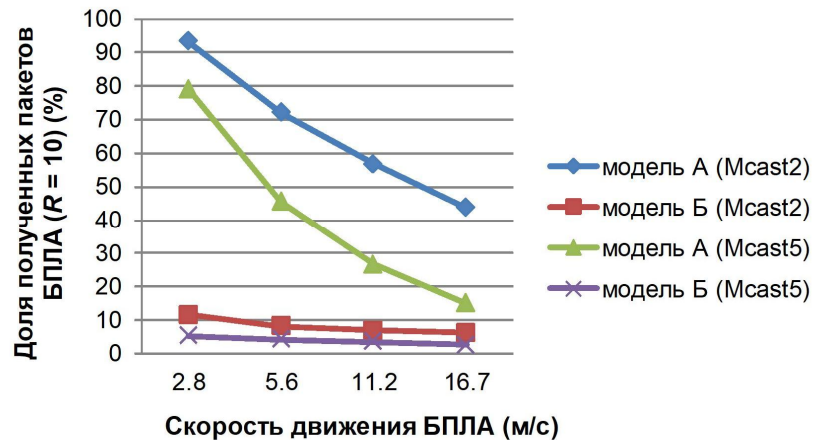


Рисунок 2.12 – Процент полученных пакетов на БПЛА при $R = 10\text{м}$

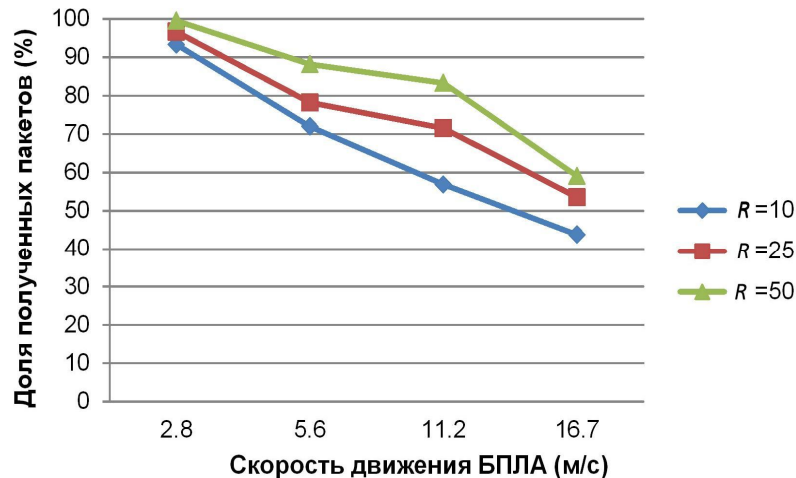


Рисунок 2.13 – Процент полученных пакетов на БПЛА при иерархической сети, период передачи сообщения Multicast равен 2 с.

2.3 Протокол для взаимодействия между БПЛА в быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p

Как известно, что летающие сети состоят из двух сегментов: летающего сегмента и наземного [37]. Необходимо, чтобы летающая сеть была легко развертываемой и самонастраивающейся сетью беспилотных летательных

аппаратов для связи со службами экстренной в наземном сегменте. Все БПЛА должны сообщаться друг с другом и со спасателями одновременно с помощью схемы многоадресных специальных сетей даже в случае, когда все инфраструктуры разрушены [138]. БПЛА не только мгновенно доставляет агрегированные данные на базовую станцию, но также имеет возможность обмениваться данными друг с другом. Более того, во время полета, если некоторые из БПЛА отключены из-за объективных условий, данные все равно могут отправляться к базе станции через другие БПЛА.

Кроме того, благодаря группы БПЛА мы можем решить такие проблемы, как короткое расстояние, сбой в сети и ограниченное руководство, которые возникают в единой системе БПЛА [144]. Несмотря на то, что такие отличительные атрибуты делают группы БПЛА подходящим решением для различных типов сценариев, они также вызывают некоторые проблемы, такие как сложность связи и сетевого взаимодействия нескольких БПЛА [145]. Кроме того, необходимо учитывать качество услуг (на англ. QoS - Quality of Services) для нескольких приоритетных услуг в летающей сети. Подуровень управления доступом к среде (на англ. MAC - Medium access control layer), который служит механизмом основного уровня связи, является важным компонентом в летающей сети. Он оказывает непосредственное влияние на пропускную способность системы, скорость передачи данных, задержку передачи и должен соответствовать многим строгим требованиям [60].

2.3.1 Характеристики протокола IEEE 802.11p

Протокол IEEE 802.11p [61] является модифицированной версией известного стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi). Использование этого протокола в летающей сети было рассмотрено во многих статьях и оказалось наиболее подходящим для летающей сети [62, 63]. Первоначально он был разработан для автомобильных самоорганизующихся сетей (Vehicular ad-hoc network – VANET). Стандарт IEEE 802.11p был принят в качестве спецификаций управления доступом к среде (MAC) и физического уровня (Physical layer – PHY) для сетей связи на короткие расстояния (Dedicated Short Range Communication – DSRC), и имеет такие характеристики, как

работа в частотном диапазоне — 5.9 ГГц (5.85 – 5.925 ГГц), широкий охват (до 1000 м) высокая скорость передачи (до 27 Мбит/с), самоорганизация и быстрая сходимость. Ожидается, что эти характеристики могут подходить не только для транспортных средств на земле, но и для взаимодействия БПЛА в воздухе, соответственно, VANET предполагается поднимать в воздух и использовать для БПЛА.

Кроме того, протокол IEEE 1609.4 [64] позволил добавить семиканальную схему MAC к уровню MAC IEEE 802.11p (см. рисунок 2.14). Каждый канал имеет общую полосу пропускания 10 МГц. Данные протоколы включают в себя один канал управления (Control Channel – CCH) (канал 178) для управления сетью и передачи сообщений безопасности и шесть служебных каналов (Service Channel – SCH) (каналы: 172, 174, 176, 180, 182, 184) для других видов трафика. Все транспортные средства должны контролировать канал управления с помощью сообщений безопасности/управления в течение периода CCH и иметь возможность переключаться на служебный канал SCH для обмена обычными приложениями. Время доступа к каналу поровну делится на повторяющиеся интервалы синхронизации по 100 мс, а каждый интервал синхронизации делится на интервалы CCH (CCHI), равные 50 мс, и интервалы SCH (SCH1), равные 50 мс (см. рисунок 2.15). Синхронизация между транспортными средствами достигается путем получения всемирного координированного времени (Coordinated Universal Time - UTC), предоставляемого GPS, установленным в каждом транспортном средстве. Следует отметить что, хотя можно использовать шесть каналов SCH, на практике канал 172 используется для обеспечения безопасности жизнедеятельности во избежание аварий, а канал 184 используется для служб большой дальности [67], поэтому мы рассматриваем только четыре канала SCH: 174, 176, 180, 182. Комбинация IEEE 802.11p и IEEE1609.x называется стандартом беспроводного доступа для среды транспортного средства (Wireless Access for the Vehicular Environment – WAVE) [65].

Протокол IEEE 802.11p использует механизм расширенного распределенного доступа к каналу (Enhanced Distributed Channel Access – EDCA)

[66], который использует многостанционный доступ с контролем несущей и предотвращением конфликтов (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance – CSMA/CA) для поддержки различных типов приложений и качества обслуживания. Механизм EDCA позволяет сообщениям, которые имеют более высокий приоритет, иметь большую вероятность передачи, чем сообщениям с более низким приоритетом. Существует четыре типа категорий доступа: фоновый трафик (AC0), трафик с наилучшей попыткой (AC1), видеотрафик (AC2) и голосовой трафик (AC3). Приоритизация достигается за счет изменения набора параметров EDCA, включая конкурентное окно (Contention Window – CW) и арбитраж расстояния между кадрами (Arbitration inter-frame spacing – AIFS), которые увеличивают вероятность успешного доступа к среде для сообщений в реальном времени.

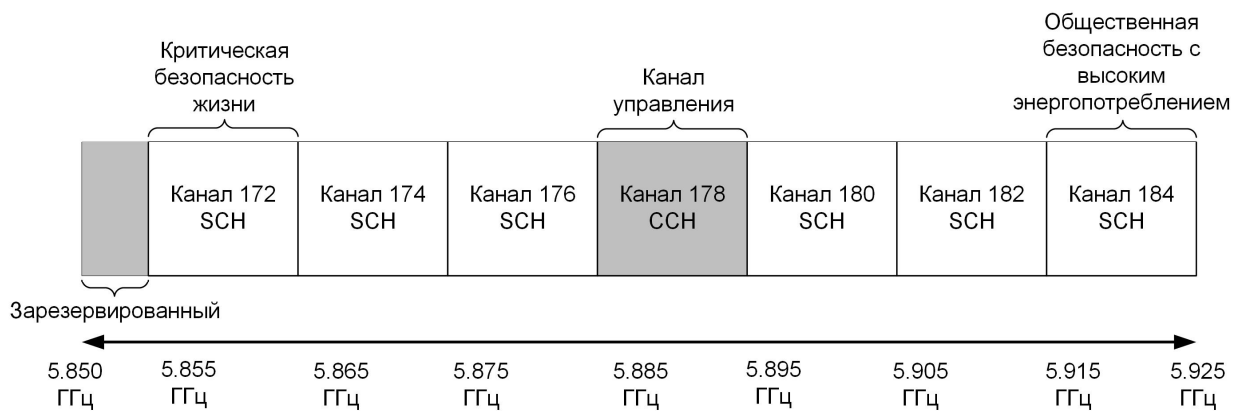


Рисунок 2.14 – Многоканальный протокол IEEE 1609.4

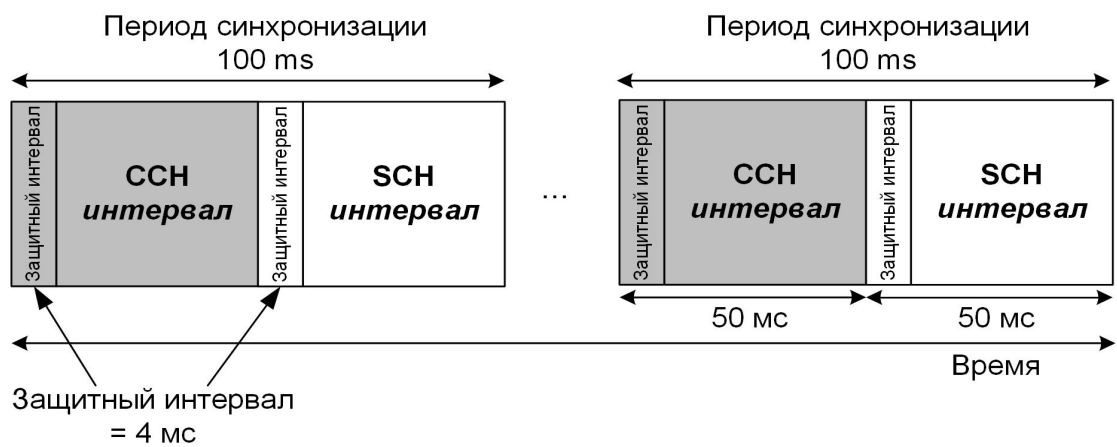


Рисунок 2.15 – Деление времени на интервалы ССН и интервалы ССН

Мы предлагаем новый протокол MAC на основе протоколов IEEE 802.11p и IEEE 1609.4 для осуществления связи между БПЛА, а также между группами БПЛА. БПЛА будут разделены на различные группы, называемые кластерами, для перемещения в спасательных зонах и выполнения миссий. Предлагаемый протокол включает в себя три разных протокола: протокол управления кластером (CMP — cluster management protocol), протокол связи внутри кластера (IntraCP — intra-cluster communication protocol) и протокол связи между кластерами (InterCP — inter-cluster communication protocol). Эти протоколы используют различные модифицированные пакеты WAVE сервисного объявления (WSA — WAVE Service Advertising) и WAVE короткого сообщения (WSM — WAVE Short Message) [68] для обновления информации, передачи данных внутри и между кластерами.

2.3.2 Многоканальный протокол MAC IEEE 802.11p на основе кластера (СММрР)

Как уже упоминалось выше, БПЛА более широко используются в специальных гражданских целях при поиске и спасении людей, которые теряются в лесу, становятся пострадавшими от стихийных бедствий, таких как землетрясения, лесной пожар, цунами и т.д. Важной проблемой этих стихийных бедствий является отсутствие телекоммуникационной инфраструктуры, которая либо полностью, либо частично разрушена. Поэтому связь между спасателями или между спасателями и пострадавшими практически невозможна. Чтобы решать эту проблему, мы предлагаем использовать беспилотные летательные системы, которые включают в себя одну или несколько мобильных базовых станций (MBS — mobile base stations) и ориентированные на миссию группы БПЛА, которые можно рассматривать как мобильные гетерогенные шлюзы. Благодаря группам БПЛА мы можем создать быстроразворачиваемую летающую сеть для экстренных служб [139], чтобы поддерживать и обеспечивать возможность связи при поиске и спасении. Одна из причин создания сети БПЛА заключается в том, что зона покрытия обычно не большая при использовании высокой скорости передачи данных. (см. рисунок 2.16).

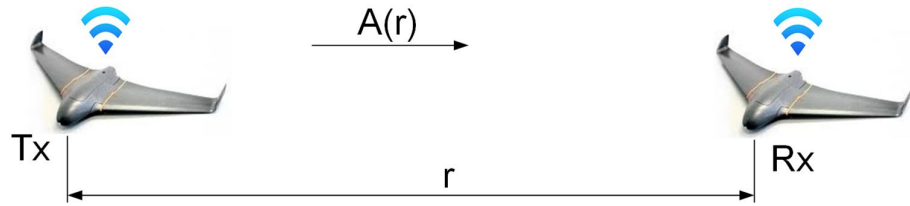


Рисунок 2.16 – Расстояние между двумя БПЛА, связанное со скоростью передачи данных

Мы можем рассчитать максимальное расстояние между двумя БПЛА, связанное со скоростью передачи данных, как в формуле (2.5):

Предполагается, что антенны выровнены вдоль поляризации, и обе антенны имеют единичное усиление [70].

$$a(r) = \frac{P_r}{P_t} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2, \quad (2.5)$$

где $A(r)$ — затухание по формуле Фриса на расстоянии r ;

G_t — усиление передающей антенны при всенаправленной передаче $G_t = 1$;

G_r — усиление антенны приемника при всенаправленной передаче $G_r = 1$;

P_t — мощность передающей антенны (Вт) (без потерь);

P_r — прием мощности антенны (Вт) (без потерь);

r — расстояние между антеннами (м);

$\lambda = \frac{c}{f}$ — длина волны в метрах, соответствующая частоте передачи;

$A(r) = 10 \cdot \lg(a(r))$ — затухание по формуле Фриса на расстоянии r в форме логарифма;

$P_{tx} = 10 \cdot \lg \frac{P_t}{10^{-3}} (dBm) = 28,8 (dBm)$ [69] — уровень мощности передающей антенны;

$P_{rx} = 10 \cdot \lg \frac{P_r}{10^{-3}} (dBm)$ — уровень мощности приемной антенны;

$P_n = -90 (dBm)$ — Мощность шума более 10 МГц;

$$P_{rx} = P_{tx} - P_n.$$

Из этих формул получается таблица 2.3.

Из таблицы 2.3, если скорость передачи данных составляет 12 Мбит/с, то расстояние между двумя БПЛА составляет всего 445 м. Таким образом, зона покрытия не большая. Именно поэтому мы должны создать сеть БПЛА (см. рисунок 2.17).

Таблица 2.3 – Соотношение между максимальным расстоянием и скоростью передачи данных

Скорость передачи данных (Мбит/с)	Максимальное расстояние (м)
3	1115
6	790
12	445

В быстроразворачиваемой летающей сети, ориентированной на поиск пострадавших после стихийного бедствия, группы БПЛА перемещаются с определенным полётным заданием и имеют географическое ограничение. В такой сети, БПЛА взаимодействуют друг с другом, чтобы получать полетное задание от МБС или пересылать собранные данные на МБС [71] (см. рисунок 2.17).

В частности, МБС развернуты группы БПЛА в областях вокруг МБС для сбора информации, которая будет распространяться между БПЛА и передаваться на МБС. Кроме того, группы БПЛА вместе также выступают в качестве посредников для установления соединений и передачи данных между базовыми станциями, чтобы создать своевременную, эффективную и действенную спасательную систему и увеличить зону покрытия летающих сетей.

Кроме того, при поиске и спасении, необходимо поддерживать связь между спасателями или между спасателями с пострадавшими или между пострадавшими с их родственниками. Чтобы достигнуть этих целей, мы предлагаем архитектуру, которая использует летающую сеть для экстренных служб по спутниковым системам. Спутниковые системы, охватывающие всю Землю, могут подключаться практически к любой точке на земле. Спутниковые пользовательские терминалы — это мобильные устройства, которые помогают быстро подключаться к спутникам. Для подключения к устройствам пострадавших, а также для передачи данных на МБС или на спутники на борту БПЛА имеются: спутниковый терминал

пользователя, модуль IEEE 802.11p и модуль IEEE 802.11n/ac. В этой архитектуре голосовой трафик может передаваться от абонента через БПЛА с помощью VoWi-Fi к MBS (или к БПЛА), который может подключаться к спутнику и через спутниковые системы к оператору связи (см. рисунок 2.18).

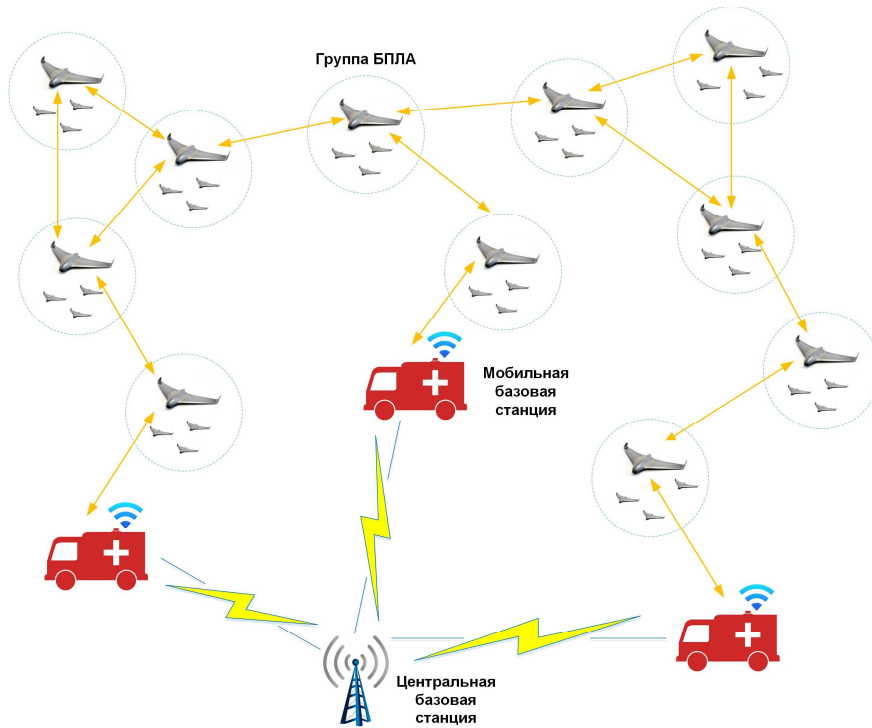


Рисунок 2.17 – Сеть БПЛА для экстренной службы

Предложен модифицированный MAC-подуровень на основе протоколов IEEE 802.11p и IEEE 1609.4 для осуществления связи между БПЛА, а также между группами БПЛА. Предлагаемый протокол включает в себя три разных подпротокола:

- протокол управления кластером (CMP);
- протокола внутрикластерной связи (IntraCP);
- протокола межкластерной связи (InterCP).

Обозначим комбинацию этих протоколов как многоканальный протокол MAC IEEE 802.11p на основе кластера (на англ. CMMpP — cluster-based Multichannel MAC IEEE 802.11p protocol) (см. рисунок 2.19). В этом случае группа БПЛА рассматривается как кластер, а БПЛА — как узел. Предлагаемый протокол ориентирован на передачу данных между элементами ячеистой сети (Mesh network),

в которой маршрутизация должна выполняться на канальном уровне, или, другими словами, маршрутизация должна основываться на MAC-адресах. В этом заключается отличие от мобильных Ad-hoc сетей, в которой основное внимание сосредоточено на стандартизации функций сетевого уровня [150].

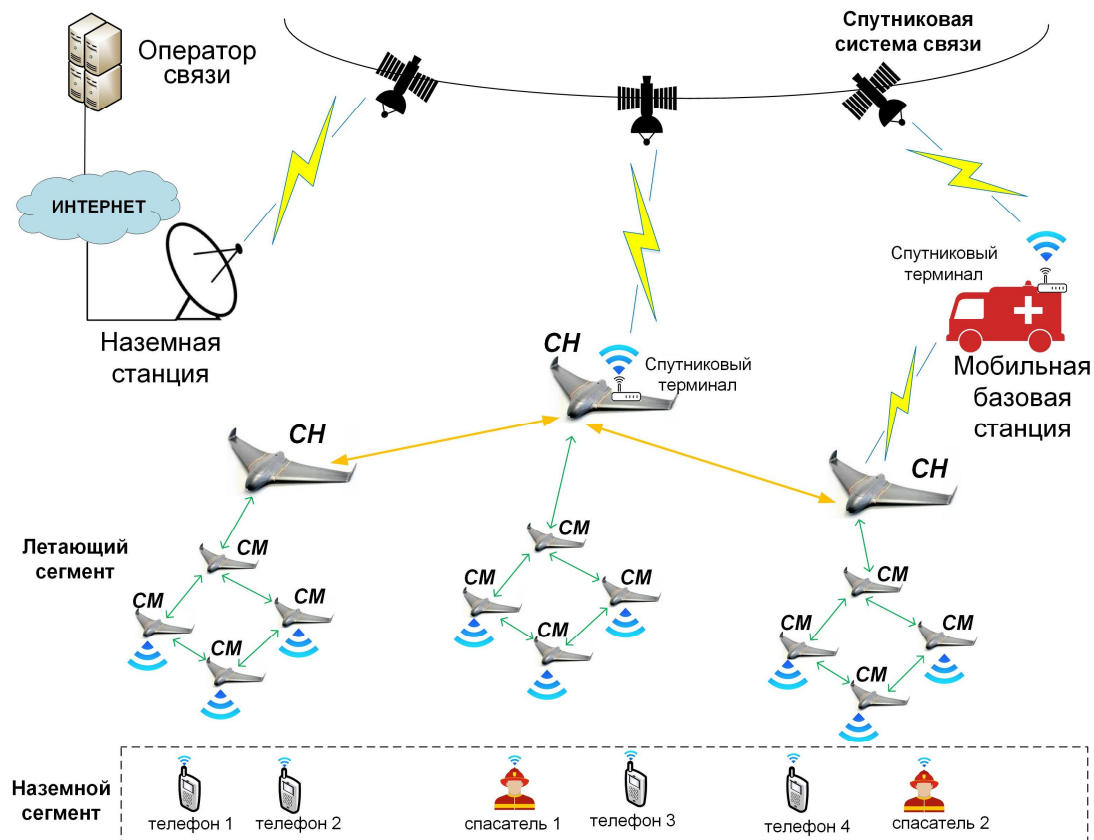


Рисунок 2.18 – Архитектура летающей сети для экстренных служб с помощью спутниковой системы связи

Чтобы не усложнять проблему, у нас есть следующие предположения:

— В начале миссии узлы будут разделены на разные кластеры, и у каждого кластера будут разные направления полета для сбора информации, а также для увеличения зоны покрытия сети. Каждый узел в кластере также имеет свою собственную скорость полета и направление полета, но эта разница находится в допустимых пределах для обеспечения стабильности кластера. Кроме того, во время выполнения задачи ни один узел не покинет кластер или не присоединится к нему.

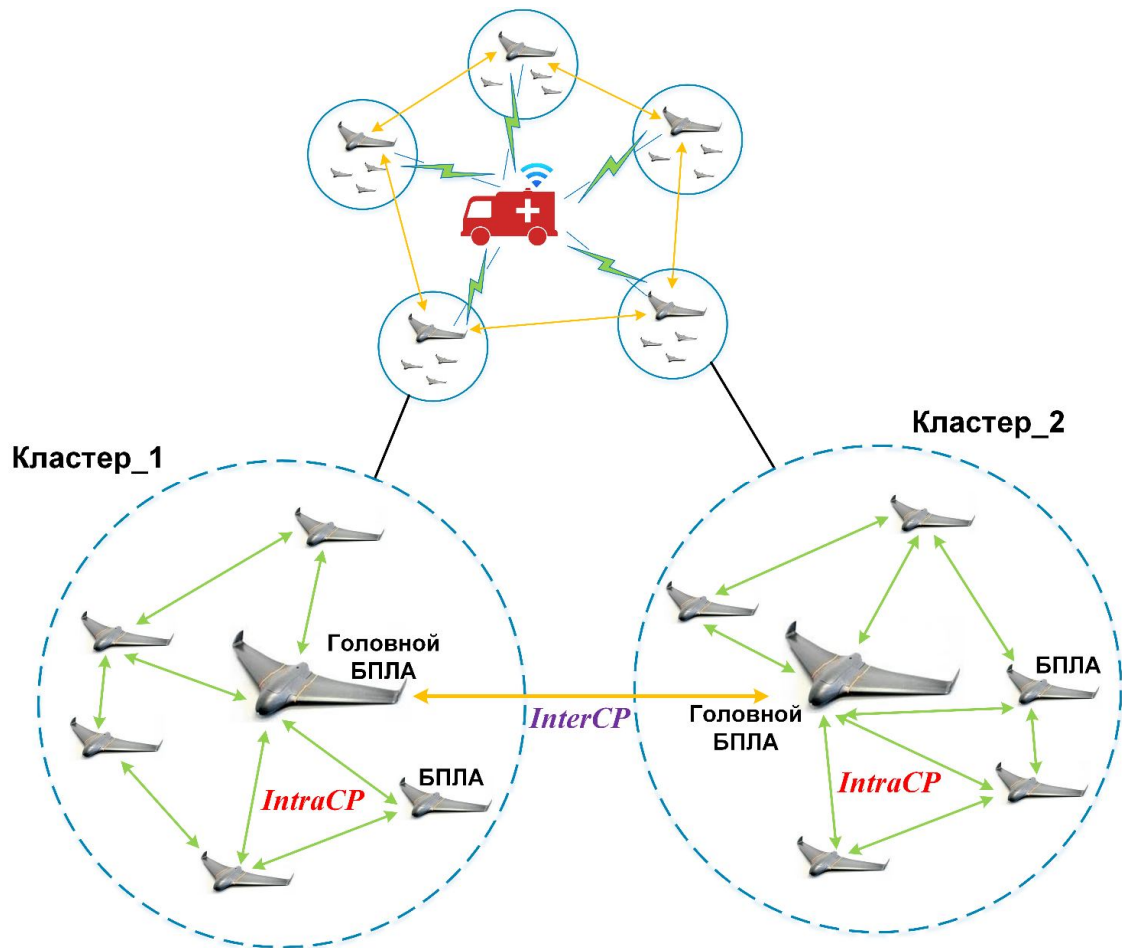


Рисунок 2.19. Метод построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p

— Все БПЛА оснащены устройством GPS (Global Positioning System) для определения местоположения, а координаты популярности БПЛА по времени достаточно малы, поэтому ошибки в расчетах можно игнорировать.

— Мы используем два приемопередатчика на каждом БПЛА для поддержки многоканальной передачи одновременно, поскольку негативное влияние переключения каналов на эффективность использования спектра и производительность приложений безопасности не делает подход с одним радиомодулем хорошим вариантом для многоканальных архитектур MAC [12]. Это приемлемо и было предложено в ряде других исследований [73, 74].

На первом шаге поисковой операции МБС перемещается в зону предполагаемого поиска. На втором шаге разворачиваются группы БПЛА

(кластеры) для сбора информации, установления связей и обмена данными. Эти кластеры используют протокол СМР для выбора головного узла кластера (на англ. СН — Cluster Head). Головной узел СН может переназначаться во время выполнения задачи в зависимости от местоположения, скорости узлов в кластере. Узел СН отвечает за сбор информации от членов кластера (на англ. СМ — Cluster Member) и последующую ее передачу на МБС или на СН других кластеров. Узел СН также выступает в качестве промежуточного звена для передачи данных, планирования, назначения канала посредством управления сообщениями.

Узлы будут использовать IntraСР и InterСР для передачи данных. Эти протоколы используют многоканальный MAC-подуровень стандарта IEEE 1609.4 и IEEE 802.11р в сочетании с TDMA для осуществления каждого сеанса связи. В частности, протокол IntraСР выполняет следующие основные задачи:

- Сбор/доставка управляющих сообщений от/к СМ по каналу ССН.
- Распределение доступных каналов SCH для СМ для передачи данных.
- Приоритизация при передаче данных по SCH в кластере.

Между тем протокол InterСР отвечает за установление связи между различными кластерами (передачу как управляющих сообщений по каналу ССН, так и данных по каналу SCH).

Протокол управления кластером (на англ. Cluster Management Protocol — СМР) отвечает за поддержание и выбор головной узел в каждом кластере. Вначале, узел в центре кластера будет головным узлом. Это гарантирует, что узлы с самого начала могут обмениваться информацией друг с другом.

Выбор головного узла основывается на суммарном весовом коэффициенте f , который учитывает различные метрики. Эти метрики включают информацию каждого узла о скорости узла (V) и расстоянии до соседей узла (D). Узел идентифицирует своих соседей, обмениваясь этой информацией через управляющие сообщения, используя протокол IntraСР (в следующем разделе).

Вес скорости i -го узла может быть выражен как формула (2.6):

$$f_v(i) = \frac{1}{|V_i - V_{avg}|}, \quad (2.6)$$

где $V_{avg} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}{n}$;

n — это количество соседей;

V_i — скорость i -го узла.

Уравнение (2.6) представляет среднюю разницу скорости между одним узлом и всеми его членами в кластере. Идея здесь заключается в том, что изменение группы БПЛА будет меньше если скорости всех узлах приблизительно равны.

Далее мы рассчитываем центральную позицию по формуле (2.7)

$$D_{avg} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i, \sum_{i=1}^n y_i, \sum_{i=1}^n z_i \right), \quad (2.7)$$

где (x_i, y_i, z_i) является координатой i -го узла, и мы можем считать вес расстояния i -го узла по формуле (2.8):

$$f_d(i) = \frac{1}{\sqrt{(x_i - D_{avg})^2 + (y_i - D_{avg})^2 + (z_i - D_{avg})^2}} \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) представляет среднее расстояние между всеми соседями и самим собой. Это означает, насколько соседи близки к одному узлу. Здесь также большое значение является предпочтительным, поскольку узлы, которые расположены ближе друг к другу, будут дольше оставаться в диапазоне передачи друг друга.

Комбинируя эти меры, получаем общий весовой коэффициент f , который показывает возможность узла, который будет становиться головным узлом. Чем больше f , тем лучше шанс для узлы будет головным узлом. Коэффициенты w_v , w_d могут быть выбраны между 0 и 1 в соответствии с различными сценариями. Их сумма должна привести к 1 (формула (2.9)).

$$F = w_v f_v(i) + w_d f_d(i) \quad (2.9)$$

Каждому узлу необходимо периодически обновлять информацию о местоположении узла, скорости узла в кластере, ClusterID, запросах канала SCH (если есть данные для отправки) и приоритете обслуживания (с наборами параметров EDCA (таблица 2.4)) всем членам своего кластера с помощью управляющих сообщений, где:

- Местоположение определяется системой GPS.
- ClusterID - это идентификация кластера.
- Запрос канала SCH - это информация, которая сообщает, что этому узлу должен быть назначен канал SCH для передачи данных. Он также указывает, нужен ли ему канал SCH для внутри- или межкластерной связи.
- Приоритет указывает тип трафика, передаваемого в канале SCH в следующем интервале. Четыре уровня приоритета используются, как показано в таблице 2.4 [75].

Поскольку оба протокола IntraCP и InterCP поддерживают друг друга, а также могут происходить одновременно, мы не будем представлять каждый протокол отдельно, а объединяем его как протокол CMMrP.

Таблица 2.4 – Требования к параметрам задержки для каждого типа трафика

Приоритет	Тип трафика	Допустимое значение задержки
1	Голос, высокоинтерактивное видео	100 мс
2	Интерактивное видео	100 – 400 мс
	Видео трансляция	<1 с
3	Лучшее усилие	не нормируется
4	Фон	не нормируется

В предлагаемом протоколе CMMrP каждый узел оснащен двумя приемопередатчиками, которые обозначены соответственно «Передач_1» и «Передач_2», которые могут работать одновременно на разных каналах. Передач_1 всегда настроен на SCH для мониторинга и выполнения передачи управляющих сообщений по каналу SCH, а Передач_2 настроен на любой канал SCH (каналы 174, 176, 180, 182) для выполнения передачи данных. Поэтому вместо

использования интервалов CCH (CCHI) и интервалов SCH (SCHI) с длительностью 50 мс для каждого из них мы можем использовать весь интервал синхронизации 100 мс. В дополнение к использованию канала 178 CCH для управляющих сообщений, мы предлагаем использовать канал 182 SCH исключительно для InterCP. Таким образом, каналы 174, 176, 180 SCH будут использоваться CM для IntraCP. Следует отметить, что для передачи данных, происходящей в кластере (IntraCP), могут использоваться только каналы SCH 174, 176, 180. Между тем межканальная связь (InterCP) будет осуществляться по каналу SCH 182. Эти операции происходят в неперекрывающихся каналах, поэтому они не влияют друг на друга.

Операция Передач_1. Во-первых, СН отправит пакет сообщения маяка (B — Beacon), чтобы уведомить о начале интервала синхронизации (SI — Synchronization Interval) по каналу CCH всем членам кластера. После получения уведомления CM ответит, чтобы обновить всю информацию узлов, используя пакеты UDI в период обновления информации. Информация в этом пакете UDI будет использоваться для переопределения СН для следующего интервала синхронизации, если это необходимо, и для обновления запросов на использование каналов SCH. На основе запросов канала СН, СН создает расписания для внутренних и межсистемных передач у CM в следующем интервале SI. Затем, в период назначения, СН транслирует пакет, чтобы объявить расписание передач (ST-пакетов) для CM. Пакет ST указывает о том, что какой узел будет использовать какой канал SCH для передачи данных в кластере или между различными кластерами. Кроме того, ST также показывает информацию узла СН для следующего интервала. Чтобы повысить надежность и гарантировать, что узлы CM принимают ST-пакеты, СН отправит ST-пакеты 2 раза. Все эти процессы происходят с механизмом TDMA на канале CCH по протоколу IntraCP. На рисунке 2.21 показана операция протокола CMMpP.

Принцип передачи в каналах SCH для CM заключается в следующем: СН принимает информацию запроса канала SCH от CM. СН затем ищет редко используемый (для уменьшения помех) канал SCH в списке доступных каналов

SCH в соответствии с целью внутри- или межкластерной связи. Тогда канал SCH будет уведомлять CM через пакет ST.

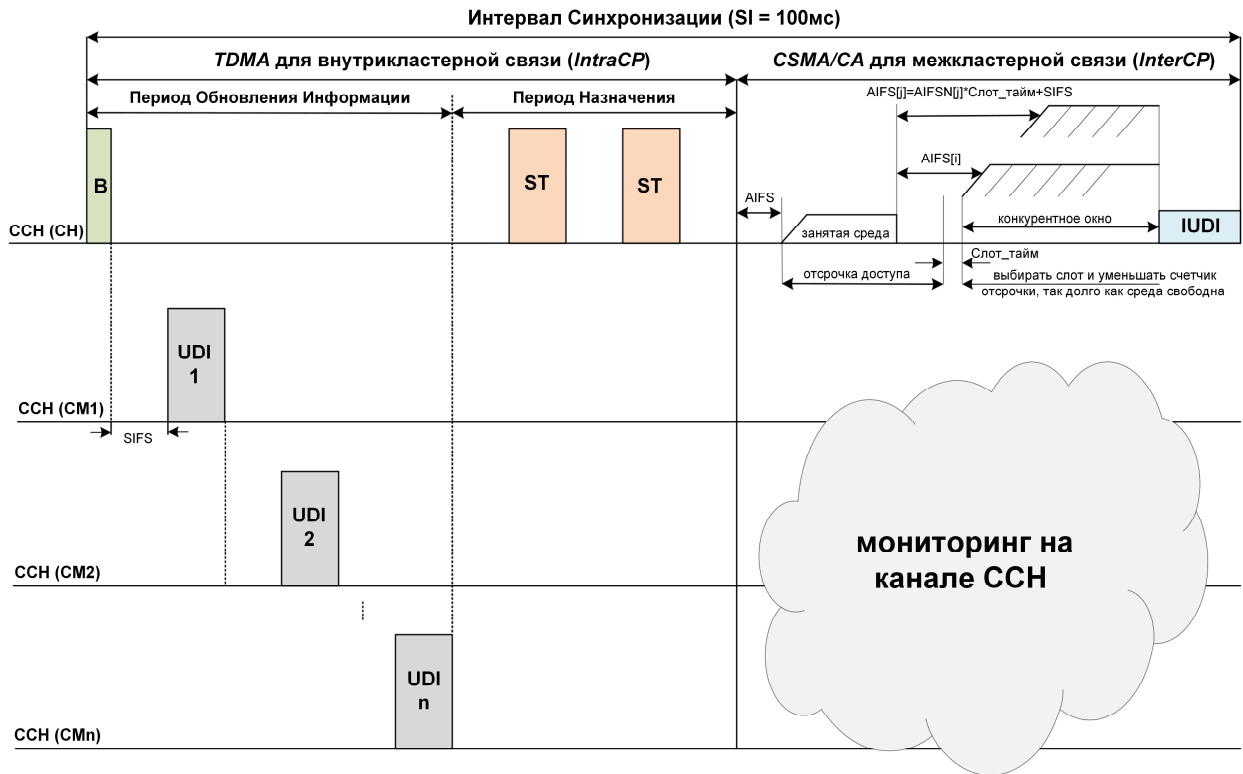


Рисунок 2.20 – Структура обмена данными между БПЛА на базе протокола SMMpP

После окончания периода внутрикластерной связи, СН выполняет межкластерную связь с использованием основанного на конкуренции механизма CSMA/CA в IEEE 802.11p, чтобы конкурировать с СН других кластеров. Когда среда находится в режиме ожидания, она передает широковещательный пакет IUDI межкластерной связи для распространения всей информации кластера, списка активных узлов и назначенных каналов SCH на другие каналы СН (см. рисунок 2.20).

Операция Передач_2. Одновременно с процессами в канале CCH, узлы также передают данные по каналам SCH. На каналах SCH, узлы, включая СН, постоянно конкурируют за передачу данных через механизм CSMA/CA в EDCA стандарта IEEE 802.11p. Это означает, что те узлы, которые участвуют в процессе передачи данных, но имеют один и тот же назначенный канал SCH, будут конкурировать на основе обновленной информации о приоритете и соответствующих наборов

параметров EDCA. Мы используем приоритет, используя различные параметры EDCA, чтобы убедиться, что трафик, допустимый к задержке, передается раньше других потоков (таблица 2.4). Следует отметить, что передачи, происходящие в кластере (IntraCP), могут использовать только каналы SCH 174, 176, 180. Между тем межканальная связь (InterCP) будет осуществляться по каналу SCH 182. Эти операции происходят в неперекрывающихся каналах. поэтому они не влияют друг на друга.

Мы изменяем формат пакета WAVE Service Advertising (WSA) [68], используя опциональные поля для создания пакета UDI. На рисунке 2.21 показан формат пакета UDI.

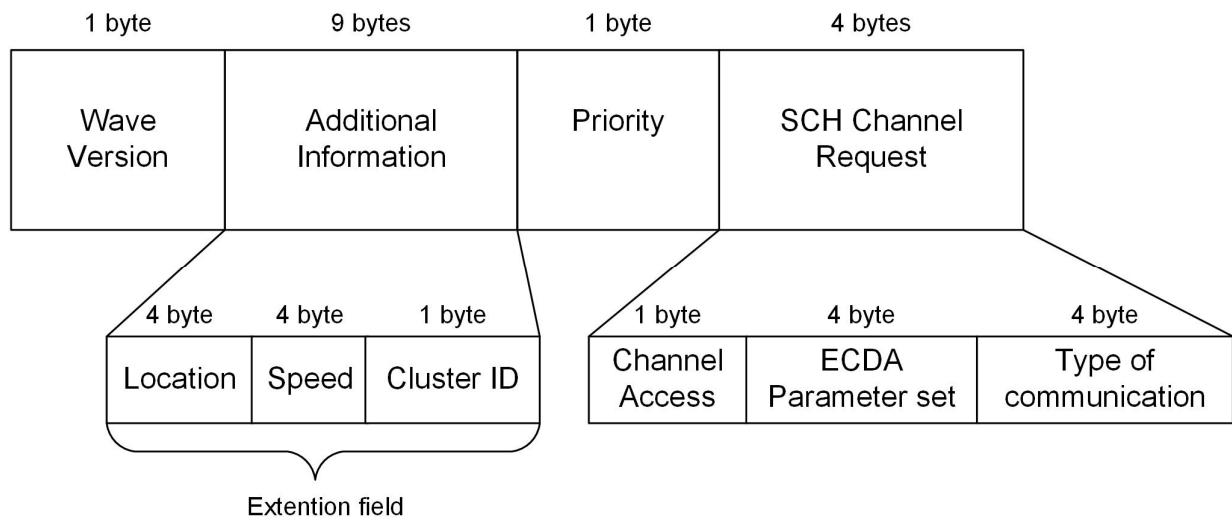


Рисунок 2.21 – формат пакета UDI

Поле «версия WAVE» определяет формат этого WSA. Номер версии, связанный с текущим стандартом, равен 1.

Поле «дополнительная информация» (Additional Information) включает в себя:

- Подполя «местоположение» (Location) и «скорость» (Speed) указывают местоположение и скорость узла в кластере.

- Подполе «Кластер ID» (ClusterID) идентифицирует кластер.

Сервисное поле включает в себя подполе «Приоритет» (Priority) и подполе «набор параметров» (Parameter set) EDCA. Приоритет указывает приоритет трафика, который должен отправить текущий узел, как показано в таблице 2.4.

Набор параметров EDCA указывает predetermined параметры EDCA в соответствии с приоритетом. Некоторые исследования фокусируются на этом параметре для поддержки качества обслуживания в конкурентном механизме [76–78].

Поле «запрос канала» SCH (SCH Channel Request) включает в себя два подполя для уведомления СН о требовании передачи по каналу SCH в следующем интервале.

- Подполе «доступа к каналу» (Channel Access) используется, чтобы указать, что этому узлу нужно назначение канала SCH или нет. В частности, если последний бит равен 1, он требует, чтобы СН назначил канал SCH; если последний бит равен 0, ему не нужен канал SCH в следующем интервале.

- Подполе «тип связи» (Type of Communication) указывает внутрикластерную связь (последний бит равен 1) или межкластерную связь (последний бит равен 0). Узел СН использует эту информацию для соответствующего назначения.

Для формата пакета ST мы модифицируем формат пакета короткого сообщения WAVE (WSM — WAVE Short Message) [68], как показано на рисунке 2.22.

1 byte	1-4 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	2 byte	variable
Version	PSID	Cluster ID	SCH Channel assignment	Active nodes	Priority	Next CH	WSM WAVE Element ID	Length	WSM Data (Payload)

Рисунок 2.22 – формат пакета ST

Версия, идентификатор службы провайдера (PSID - Provider Service Identifier), WSM WAVE идентификатор элемента (WSM WAVE Element ID), длина и данные WSM (полезная нагрузка) являются обязательными полями пакета WSM. Мы добавляем поле назначения канала SCH, чтобы указать список назначенных каналов SCH для CM.

Поле «следующий головной узел» (Next CH) используется для уведомления о новом узле СН в следующем интервале SI.

Предлагаем использовать широковещательные пакеты IUDI для уведомления СН другого кластера об информации его собственного кластера (см. рисунок 2.23). Этот пакет похож на пакет ST, и мы добавим некоторые из следующих полей.

Поля «версия», «PSID», «WSM Wave идентификатора элемента», «длина», «данные WSM» (полезная нагрузка) по умолчанию являются обязательными.

Поле «активные узлы» (Active nodes) указывает список активных узлов, которые имеют данные для передачи по каналам SCH.

Поле «службы» (Service) аналогично полю службы в формате пакета UDI.

1 byte	1-4 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	2 byte	variable
Version	PSID	Cluster ID	SCH Channel assignment	Active nodes	Priority	Next CH	WSM WAVE Element ID	Length	WSM Data (Payload)

Рисунок 2.23 – формат пакета IUDI

2.3.3 Моделирование протокола CMMpP

Моделирование было выполнено в пакете Riverbed Modeler, по результат была проведена оценка функционирования предлагаемого протокола CMMpP. Как показано в [151, 152] в пакете Riverbed Modeler отсутствует модуль IEEE 802.11p, который был бы ориентирован для использования в летающих сетях. При задании исходных данных были выбраны все модели с полосой пропускания 10 МГц, скорость передачи данных установлена 12 Мбит/с, а точка доступа — в качестве головного узла кластера (СН). Что касается моделирования ССН, все транспортные средства должны работать на центральной частоте с номером 178 и должны быть в диапазоне 5885-5895 МГц. В этой связи минимальная частота должна быть 5885 МГц. Другие параметры задаются по умолчанию или как в [152].

Оценим множество сценариев с одной центральной базовой станции, одной мобильной базовой станцией, пятью кластерами и числом членов узлов (СМ) в каждом кластере: 4, 8, 16 и 32. Мобильность узлов с траекториями определяется модулями Mobility Config и Trajectory. Конфигурация приложения (Application) и конфигурация профиля (Profile) используются для создания сообщений и настройки сценариев. Продолжительность каждого сценария моделирования составляет 60 минут, а параметры EDCA задаются по умолчанию.

Рассмотрим передачу служебных сообщений и голосового трафика. На рисунке 2.24 приведена средняя пропускная способность для каждого из членов узлов в одном кластере, имеющем 8 СМ и 1 СН. При формировании кластеров, в случае использования 5 кластеров по 8 узлов, средняя пропускная способность между кластерами составляет до 5 Мбит/с, а между узлами кластера составляет 2 Мбит/с. Поскольку поток трафика через СН всегда большой, средняя пропускная способность канала СН1 также самая большая.

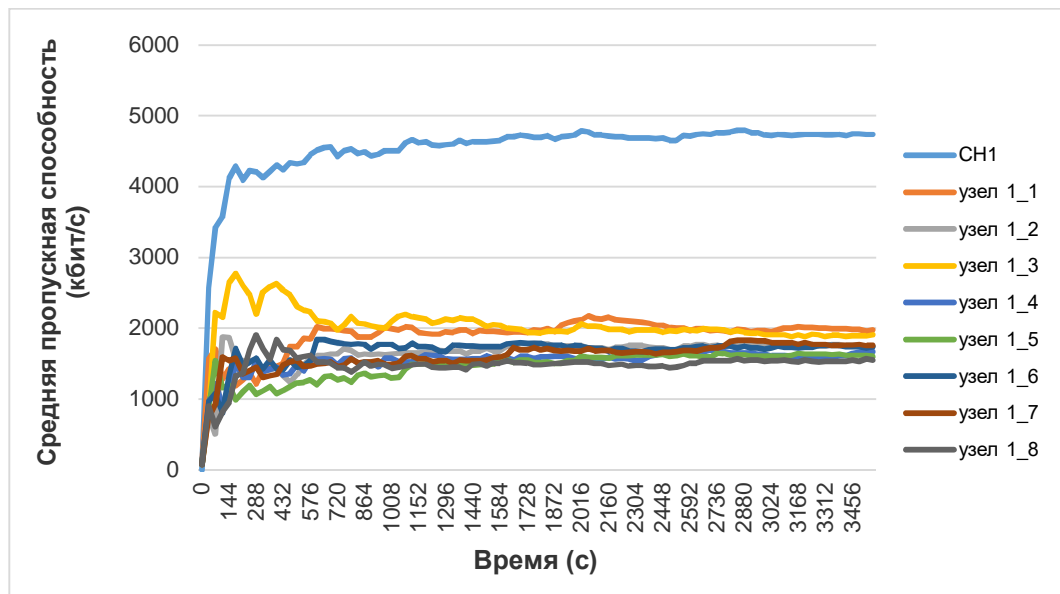


Рисунок 2.24 – Средняя пропускная способность для каждого из членов узлов в одном кластере

Количество попыток повторной передачи для разных сценариев показано на рисунке 2.25. Видно, что по мере увеличения размера сети, число узлов, использующих один и тот же канал SCH, увеличивается. Количество попыток повторной передачи данных в кластере из 32 узлов увеличивается на 37% по сравнению со случаем, когда в кластере 4 узла. Это приводит к конфликтам во время передачи, и, следовательно, количество попыток повторной передачи увеличивается со временем. Следует отметить, что вертикальная ось этого графика представляет соотношение: количество пакетов, которые должны быть повторно переданы к общему количеству пакетов.

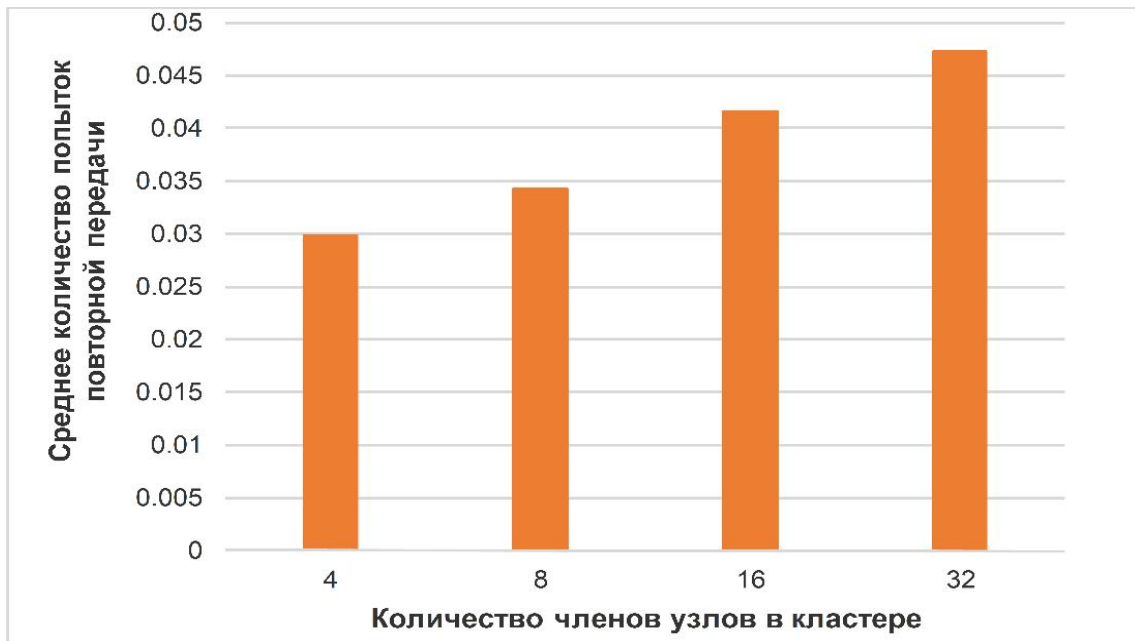


Рисунок 2.25 – Среднее количество попыток повторной передачи для разного количества членов узлов в кластере

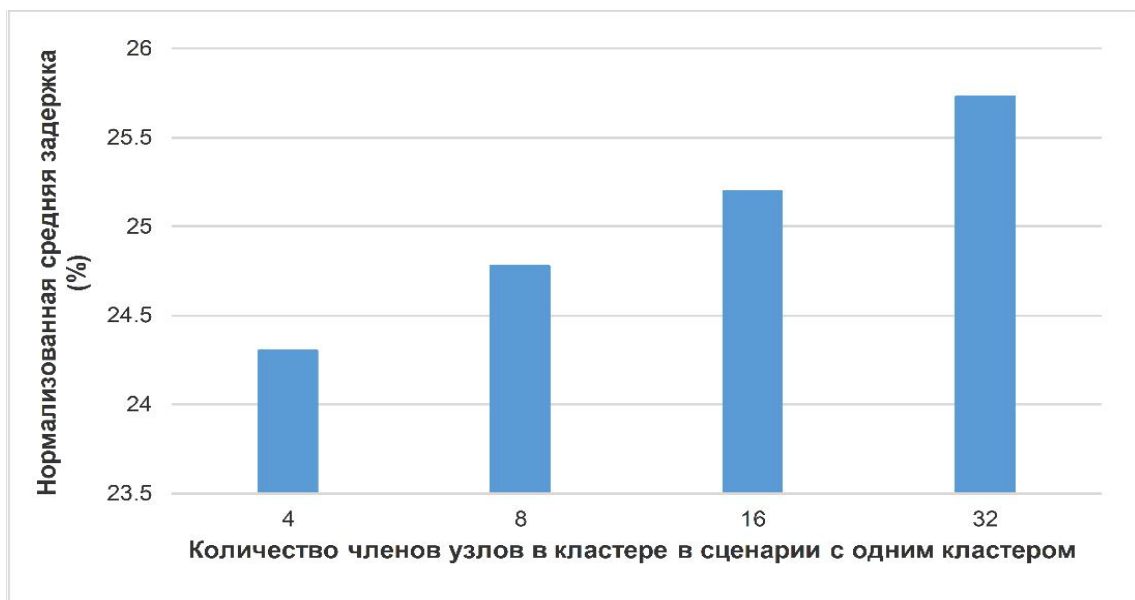


Рисунок 2.26 – Нормализованная средняя задержка для сценария с одним кластером

Поскольку каждая из разных начальных конфигураций сетей будет давать результаты с разными абсолютными значениями, а также важно сосредоточиться на сравнении сценариев, на рисунке 2.26 мы использовали нормализованные графики (нормализованная средняя задержка) для представления средней задержки при передаче пакетов в протоколе СММрР в сценарии с одним кластером, но

разным количеством членов узлов. Нормализованная средняя задержка при сценарии с одним кластером, когда в кластере 32 узла, увеличивается на 6% по сравнению со случаем, когда в кластере 4 узла. Видно, что чем больше количество членов узлов в кластере, тем выше задержка в сети.

Выводы по главе 2

Была разработана имитационная модель взаимодействия гетерогенного шлюза, расположенного на БПЛА, который используется для сбора данных с наземной сети (на базе протокола 6LoWPAN) и последующей отправки полученных данных в сеть связи общего пользования (на базе технологии LoRa). Анализ полученных результатов показал, что иерархическая сеть является более предпочтительной для организации наземной сети. БПЛА имеет ряд недостатков, таких как органичное время работы, в этой связи, увеличив скорость возможно облететь большую территорию. Наибольшее количество обслуженных узлов (больше 80%) наблюдается при радиусе обслуживания БПЛА не меньше 50 м и скорости движения БПЛА 11,2 м/с (40 км/ч) с периодом отправки сообщений Multicast 2 с. Аналогичные результаты по доставке данных можно достигнуть путем снижения скорости движения БПЛА до 5.6 м/с (20 км/ч) с периодом передачи сообщения Multicast 5 с.

Была разработана архитектура, которая позволяет поддерживает связь между службами спасения, между спасателями с пострадавшими или между пострадавшими с их родственниками, используя летающую сеть для экстренных служб и спутниковые каналы связи.

В частности, был модифицирован протокол MAC, лежащего в основе протоколов IEEE 802.11p и IEEE 1609.4, который получил название SMMpP и предполагает использование для поддержки связи в быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб. Протокол SMMpP включает в себя три компонента: протокол управления кластером, протокол внутрикластерной связи и протокол межкластерной связи. Они используют механизмы TDMA и CSMA/CA для передачи управляющих сообщений по каналу CCH и различных видов трафика

по каналам SCH. В результате модификации был изменен формат пакетов WSA и WSM и добавлены некоторые поля/подполя в этот формат пакетов для поддержки нового протокола. Были представлены результаты имитационного моделирования, выполненные в пакете Riverbed Modeler. Анализ полученных результатов позволил продемонстрировать эффективную работу протокола и выявить особенности его функционирования.

Разработанный протокол представлен в проекте Рекомендации Сектора стандартизации Международного союза электросвязи Q.ETN-DS «Архитектура сигнализации для быстроразворачиваемой сети для использования в случае стихийного бедствия».

ГЛАВА 3: МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ГОЛОСОВОГО ТРАФИКА ЧЕРЕЗ БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩУЮ СЕТЬ ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕТЕЙ ОПЕРАТОРОВ СВЯЗИ

3.1. Исследование передачи мультимедиа контента на базе беспроводной сенсорной сети

В настоящее время одним из движущих факторов в модернизации современных сетей связи является переход к сценариям взаимодействия в рамках сетей связи пятого поколения 5G/IMT-2020 [79, 80]. Сети пятого поколения предполагают сценарии, на базе которых должна обеспечиваться бесшовная связь между устройствами и приложениями ИВ [81]. Одним из таких сценариев является взаимодействие устройств ИВ между собой в структуре самоорганизующейся сети. Самоорганизующиеся сети, как правило, имеют ячеистую топологию и позволяют обеспечить доставку данных от узла к узлу путем построения маршрута до места назначения. Ввиду того, что согласно эталонной архитектуре построения Умных городов должен обеспечиваться непрерывный мониторинг различных объектов городской инфраструктуры с возможностью получения данных с датчиков, возникает возможность использования ячеистой топологии для организации сети сбора данных с таких объектов, а также доставки их в приложения дополненной реальности (ДР) (на англ. Augmented reality (AR)) для большей информативности [82]. Оконечные устройства ИВ собирают данные датчиков, установленных на тех или иных объектах, отправляют их на сервер для дальнейшей обработки. Ввиду того, что каждый фрагмент сети, обработка на сервере, отправка в приложение ДР вносит соответствующую сетевую задержку предлагается оптимизировать данный процесс путем использования узлов обслуживания приложений (Application Point), которые будут располагаться в непосредственной близости к пользователю и сети сбора данных.

Существуют различные технологии и протоколы, на базе которых могут строиться самоорганизующиеся сети. Наиболее известны и распространены такие

как ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth. Они ориентированы на работу в нелицензируемых участках радиочастотного спектра, а отличаются друг от друга рядом параметров, например, такими как пропускная способность и энергопотребление. Поэтому каждая из этих технологий может использоваться для решения определенных прикладных задач, имеющих различные требования к параметрам функционирования сети.

Далее мы рассмотрим более подробно функционирование сетей, построенных с использованием двух технологий: ZigBee и Wi-Fi. Такой выбор обусловлен тем, что они наиболее существенно отличаются параметрами пропускной способности и энергопотребления.

Устройства на технологии ZigBee [83-85] достаточно широко распространены и имеют полную реализацию стека протоколов и программную поддержку построения самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети. Поэтому рассмотрим данную технологию на примере реальной сети, приведем результаты натурного моделирования.

Устройства на базе технологии Wi-Fi также широко распространены, однако для построения беспроводных сенсорных сетей они применяются реже из-за относительно большего энергопотребления, поэтому на данный момент не было полной реализации стека протоколов самоорганизующейся сети. Для этой технологии результаты получены методом имитационного моделирования.

3.1.1. Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений ДР на базе беспроводной сенсорной сети

Перед разработкой лабораторного стенда была описана последовательность взаимодействия элементов [50]. Существующие на сегодняшний день решения для приложений ДР предполагают формирование запроса для вывода вспомогательного слоя информации на базе видеоаналитики. Это возможно благодаря наличию у пользовательского оборудования сети подвижной связи или очков внешней камеры, которая делает снимок и в реальном времени формирует запрос в базу данных. Существующее решение имеет ряд существенных ограничений ввиду того что на удалении более 10 м, а также в ночное время

видеоаналитика работает как правило некорректно и не позволяет достоверно считывать информацию и производить видеомониторинг.

Предлагаемый ниже подход принципиально отличается от существующих решений тем, что для вывода информации об объекте используется непосредственное получение информации от этого объекта по сети.

Клиент приложения ДР: традиционно приложения ДР разрабатываются для мобильных устройств (смартфона, смарт-очков и др.). В ситуации, когда приложение хочет получить информацию о том или ином объекте, оно формирует и отправляет запрос к ближайшему узлу обслуживания приложения. Через беспроводную точку доступа на базе технологии Wi-Fi мобильное устройство подключается к узлу обслуживания приложения.

Узел обслуживания приложения ДР (сервер приложения): данный узел осуществляет взаимодействие с элементами системы и поддерживает протокольное взаимодействие. Узел обслуживается по принципу «издатель—подписчик», т. е. клиент как подписчик подписывается на каналы предоставления информации объектов, тогда клиент может получить данные от объектов, когда приложение ДР формирует запрос и ожидает данные для формирования слоя визуализации. Оконечные устройства беспроводной сенсорной сети, функционирующие как издатели, отправляют собираемые данные по этим каналам. Таким образом, информация об объектах может быть предоставлена клиенту (приложению ДР) так быстро, как это возможно.

Беспроводная сенсорная сеть для сбора данных: как говорилось ранее, в качестве самоорганизующейся сети рассматривается сеть с поддержкой протокола ZigBee. Оконечные устройства Zigbee оснащены различными датчиками, а также содержат информацию о самом объекте. Собираемые данные с заданной периодичностью отправляются к шлюзу или по запросу клиента. После этого шлюз перенаправляет запросы к облачному сервису и узлу обслуживания приложения.

На рисунке 3.1 изображена схема лабораторного стенда.

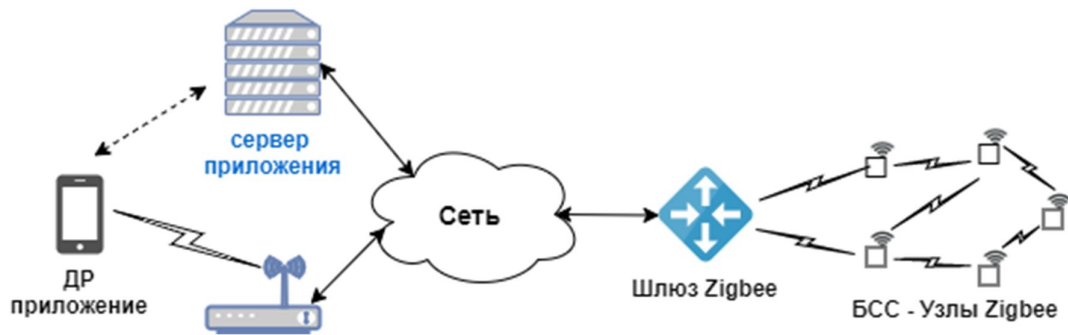


Рисунок 3.1 – Структура лабораторного стенда

В качестве устройства ДР используется пользовательское оборудование сети подвижной связи Xiaomi Redmi 6A/2 с Android 8.x, который периодически формировал и отправлял запросы к узлу обслуживания приложения.

В качестве узла обслуживания приложения использовался персональный компьютер, который был подключен к облачному сервису и шлюзу сети сбора данных.

В качестве маршрутизаторов и конечных устройств ZigBee использовались отладочные платы EM35xx Development Kit, представленные на рисунке 3.2. Оконечное устройство ZigBee могло взаимодействовать с другим контроллером с использованием соединения USB-UART. При проведении экспериментов оконечное устройство подключалось к ноутбуку, на котором была запущена программа генерации данных датчиков.

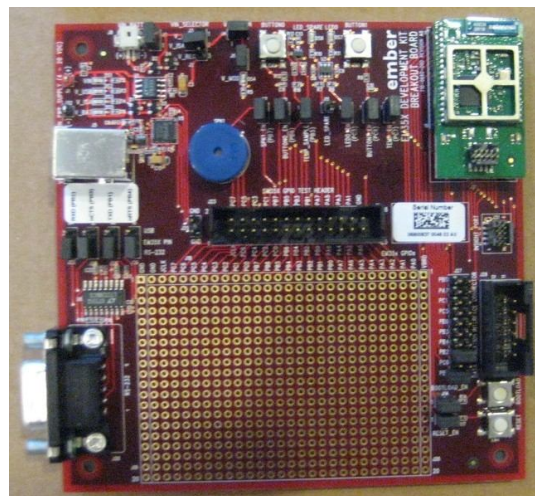


Рисунок 3.2 – Отладочная плата EM35xx

В качестве шлюза ZigBee использовался USB-шлюз ETRX3 Series ZigBee Module, представленный на рисунке 3.3. Шлюз Zigbee подключается к ноутбуку, который взаимодействует с основным облаком, а также с узлом обслуживания приложения ДР.



Рисунок 3.3 – USB-шлюз ZigBee

На пользовательском оборудовании сети подвижной связи запускалось приложение ДР, разработанное для операционной системы Android 8.x. Приложение подключалось к узлу обслуживания приложений через беспроводную точку доступа Wi-Fi и периодически отправляло запрос для получения информации от объектов. Для дальнейшего исследования качества обслуживания предоставляемой услуги, приложение записывало моменты времени отправки запроса и получения ответа.

На узле обслуживания приложения запускался сервер, который работал по принципу «издатель — подписчик».

Для шлюза ZigBee использовалась программа, написанная на Python. Программа осуществляла управление USB-шлюзом на базе AT-команд через адаптер USB-UART. Принцип работы программы заключался в следующем: шлюз получает данные датчиков и перенаправляет их к облачному сервису и узлу обслуживания приложения. Однако шлюз получает запросы из узла обслуживания приложения (от клиента) и перенаправляет их к конечным узлам. После этого шлюз получает ответы конечных устройств и перенаправляет их к узлу обслуживания приложения, чтобы предоставить их непосредственно клиенту.

Для оконечного устройства запускается программа, разработанная на языке программирования Python. Программа управляет модулем ZigBee с помощью AT-команд через адаптер USB-UART. Программа работает с учетом того, что данные

датчиков периодически генерируются и отправляются к шлюзу, однако окончательное устройство отвечает на запросы, когда оно получает их от шлюза (т. е. из клиента).

Для оценки качества обслуживания рассматривается время ожидания ответа после формирования и отправки запроса от приложения ДР. Процесс обслуживания изображен на рисунке 3.4. В начале приложение ДР отправляет запрос к узлу обслуживания (сервер приложения), далее узел обслуживания передает этот запрос к шлюзу сети сбора данных, а шлюз перенаправляет запрос к окончательному сенсорному узлу. После получения запроса, сенсорный узел посылает ответ к шлюзу, который направляет его к узлу обслуживания, а он, в свою очередь, передает этот ответ к клиенту приложения ДР.

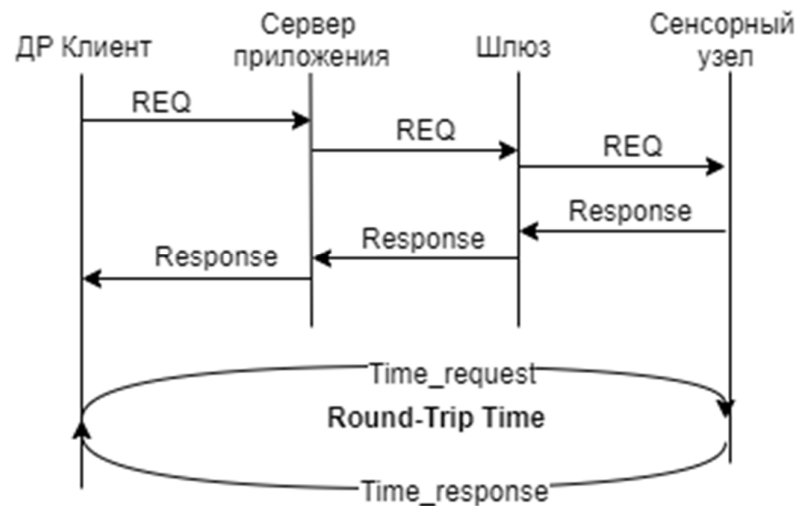


Рисунок 3.4 – Процедура запроса и ответа

Согласно структуре лабораторного стенда, можно наблюдать, что фрагмент беспроводной сенсорной сети имеет большое влияние на время предоставления данных к клиенту. Как было описано выше, ячеистая топология сети ZigBee вносит задержку и влияет на процесс передачи данных, поэтому при рассмотрении этого сценария необходимо учитывать характеристики сети, такие как плотности узлов и количество пройденных маршрутизаторов. В этой связи, для экспериментов была развернута сеть ZigBee, соответствующая двум сценариям проведения экспериментов.

Первый сценарий заключается в том, что рассматривается влияние плотности сети на круговую задержку доставки данных для приложений ДР. В этом сценарии

количество узлов в сети увеличивается на каждой стадии эксперимента, при этом времена формирования и отправки запроса и получения ответа фиксируется в соответствующий лог-файл. Распределение узлов в сети изображено на рисунке 3.5.

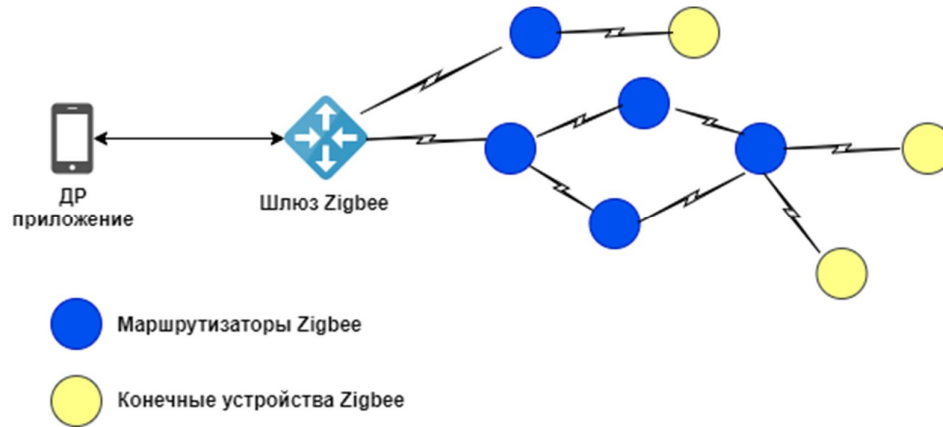


Рисунок 3.5 – Распределение узлов в сети (увеличение плотности сети)

Второй сценарий рассматривает увеличение количества маршрутизаторов между шлюзом и оконечным узлом, т. е. количество переходов для каждого пакета увеличивается. Распределение маршрутизаторов в сети изображено на рисунке 3.6.

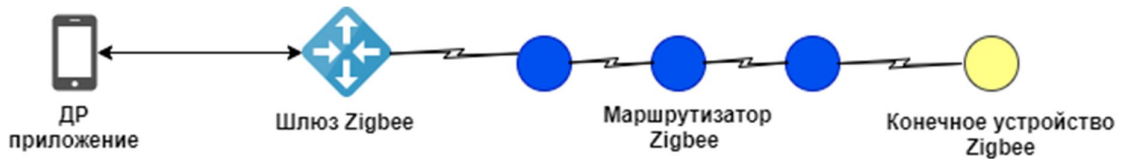


Рисунок 3.6 – Распределение узлов в сети (увеличение количества маршрутизаторов)

Для записи времени отправки запроса и получения соответствующего ответа, приложение ДР формирует и отправляет запрос с номером, например, «Request 1», и время отправки сохраняется в файле для дальнейшей обработки. Далее если сенсорный узел получает «Request 1», то он отвечает соответствующим ответом «Response 1». Когда приложение ДР получает ответ «Response 1», оно записывает время получения ответа в файл. После каждого эксперимента формируется два файла записи времени отправки и получения с сообщениями, с какого запроса и ответа. Таким образом, возможно вычислить круговую задержку между клиентом ДР и сенсорным узлом.

Для первого сценария была получена круговая задержка, которая изменяется при увеличении количества узлов в сети. Результаты экспериментов по первому сценарию представлены на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Влияние плотности сети на *RTT*

Чем больше количество узлов в сети, тем больше время задержки. Высокая плотность сети предполагает, что будет занято больше каналов или в результате одновременного обращения к среде передачи будет происходить коллизия. Следовательно, сообщения могут быть задержаны при передаче между шлюзом и конечным узлом.

Во втором сценарии было рассмотрено количество пройденных маршрутизаторов. При этом каждый запрос и ответ проходил через всю цепочку маршрутизаторов. Соответственно, круговая задержка должна увеличиваться с увеличением количества маршрутизаторов. Зависимость круговой задержки от количества переходов (хопов) для второго сценария приведена на рисунке 3.8. Согласно данным можно увидеть, что круговая задержка увеличивается с ростом количества маршрутизаторов между шлюзом и конечным узлом.

По результатам измерения задержки мы видим, что если приложение передает запрос к конечному узлу и ожидает ответ от него, то такая круговая задержка является существенной и негативно сказывается на качестве восприятия. Для оптимизации данного подхода целесообразно кэшировать собираемые данные. Данные могут быть сохранены на узле или получены по запросу к облачному сервису, на котором все данные датчиков сохраняются. В таком случае, когда

приложение ДР подключается к узлу обслуживания, то информации о соответствующих объектах сразу отправляются к нему, обеспечивая лучшее качество восприятия.



Рисунок 3.8 – Влияние количества маршрутизаторов на *RTT*

3.1.2 Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений дополненной реальности на базе беспроводной сети стандарта Wi-Fi (IEEE 802.11)

Наряду с технологией ZigBee для построения беспроводных сенсорных сетей могут быть использованы и другие технологии беспроводной связи. В частности, наибольшее распространение в настоящее время, получили стандарты Wi-Fi и Bluetooth. Они также позволяют организовать сеть ячеистой структуры Mesh или Ad-Hoc. Их особенность состоит в потенциально большей полосе пропускания канала, по сравнению с технологией ZigBee. Это дает возможность существенно сократить время доставки сообщений. Использование этих технологий также привлекательно тем, что их поддерживает большинство современных пользовательских устройств. Это дает возможность взаимодействовать с терминалом ДР напрямую, минуя шлюз. Также существуют решения для построения самоорганизующихся сетей на базе данных технологий.

Выберем для сравнения технологию Wi-Fi и проведем исследование ее потенциальных возможностей в Ad-Hoc. Для исследования будем использовать систему имитационного моделирования OMNeT++ [86]. Будем рассматривать построение модельной сети в двумерной зоне обслуживания, представляющей

собой квадрат со стороной 600 м. Выбор размеров области обслуживания произведен исходя из усредненных оценок географических параметров наиболее посещаемых мест (скверы, зоны отдыха, вокзалы, кампусы и т. д.).

Количество узлов сети будем изменять в зависимости от цели эксперимента. Каждый из узлов сети оснащен трансивером Wi-Fi и может выполнять функции, как оконечного, так и транзитного узла. Конкретная функциональность узла определяется целью эксперимента.

Будем рассматривать случай, когда узлы сети неподвижны в зоне обслуживания. В качестве транспортного уровня будем рассматривать использование протоколов TCP и UDP.

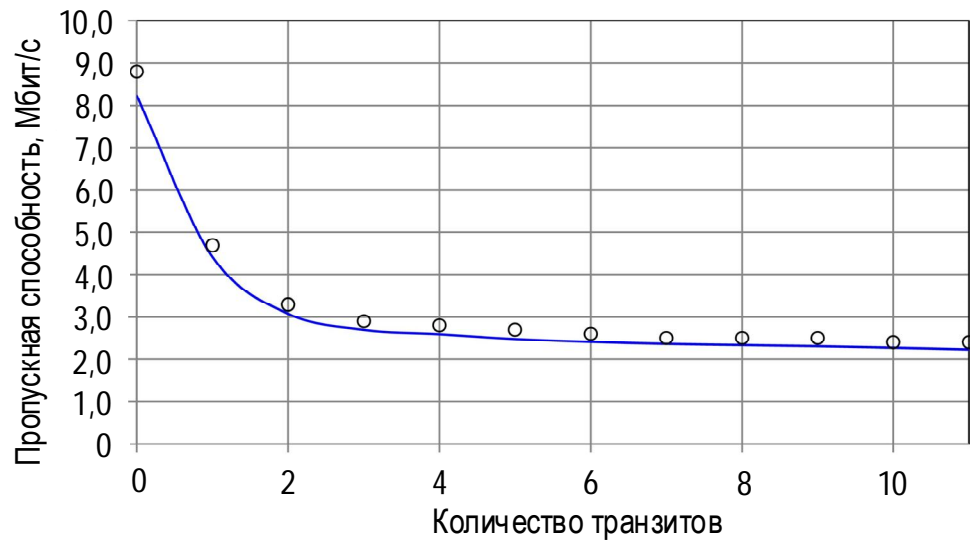
Будем исследовать зависимость основных параметров качества обслуживания трафика, таких как пропускная способность, время доставки сообщений и вероятность потерь пакетов от конфигурации сети и интенсивности трафика.

Рассмотрим зависимость пропускной способности от количества транзитов.

В общем случае длина маршрута зависит от особенностей конкретной сети и в практических приложениях может составлять до десятка транзитных участков. Рассмотрим модель сети, в которой имеются два оконечных узла, один из которых исполняет роль сервера, а второй клиента. Клиент производит передачу данных в виде файла серверу под управлением протокола TCP. Поскольку данный протокол обеспечивает гарантированную доставку и производит передачу данных на скорости близкой к максимально достижимой (максимально использует пропускную способность), то будем оценивать величину пропускной способности сети на основе анализа достижимой скорости передачи данных между клиентом и сервером. Маршрут между клиентом и сервером будет содержать несколько транзитных участков. В таблице 3.1 приведены результаты имитационных экспериментов. В ходе экспериментов производилась регистрация исходящего трафика клиента и входящего трафика сервера.

Таблица 3.1 – Зависимость параметров трафика от количества транзитов

Число транзитов	Интенсивность трафика (клиент), Мбит/с	Интенсивность трафика (сервер), Мбит/с	RTT, мс
0	8,8	8,8	7,3
1	9,4	4,7	13,6
2	7,3	3,3	19,5
3	7,0	2,9	22,3
4	6,6	2,8	23,2
5	6,2	2,7	24,3
6	6,1	2,6	25,0
7	5,9	2,5	25,5
8	5,7	2,5	25,8
9	5,7	2,5	26,1
10	5,5	2,4	26,5
11	5,2	2,4	27,0



○ Эксперимент — Аппроксимация

Рисунок 3.9. Зависимость пропускной способности от количества транзитов

На рисунке 3.9 приведена зависимость пропускной способности от количества транзитных узлов в маршруте, построенная по данным таблицы 3.1. На

том же рисунке приведена зависимость пропускной способности (бит/с), полученная по выражению:

$$b = \frac{Wnd}{RTT}, \quad (3.1)$$

где Wnd — размер окна передачи (бит);

RTT — время отклика (мс).

Размер окна в данных экспериментах составлял $Wnd = 7504$ байт. Из рисунка видно, что полученные данные достаточно близки к оценкам, согласно выражению (3.1). На рисунке 3.10 приведена зависимость круговой задержки RTT от количества транзитных узлов. Зависимость RTT рассчитывается по формуле:

$$RTT = \frac{Wnd}{b_0} + 2 \cdot b_0 \cdot (1 - e^{-k}), \quad (3.2)$$

Где $b_0 = 11000$ бит/с;

k — количество транзитных участков.

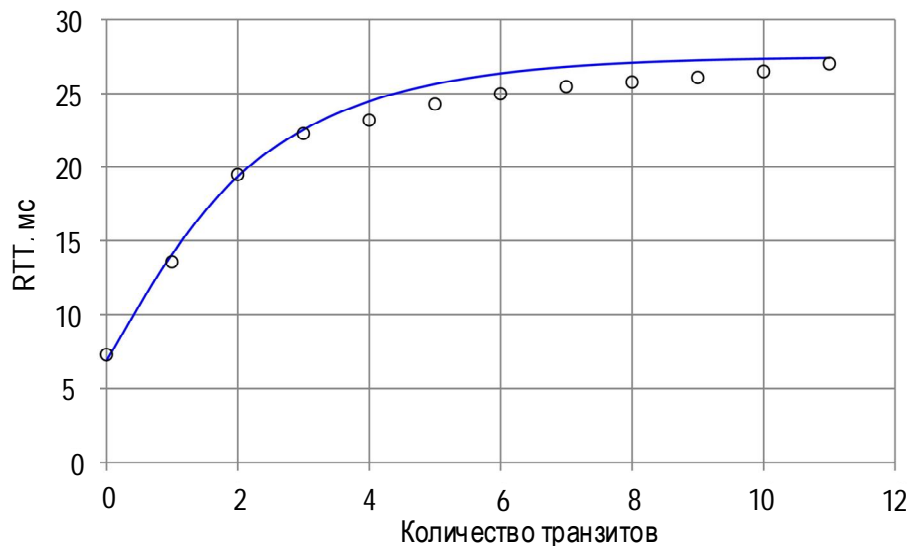


Рисунок 3.10 – Зависимость круговой задержки RTT от количества транзитов

Рассмотрим зависимость вероятности потерь от интенсивности трафика. Структура модели аналогична той, которая использована в предыдущем эксперименте. Сеть состоит из 13 узлов, представляющих собой один «линейный» маршрут. Между узлом-источником и узлом назначения передаются дейтаграммы

UDP через 11 транзитных узлов. В ходе эксперимента регистрируются переданные и принятые дейтаграммы. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента

Интенсивность трафика, Мбит/с	Средний интервал между дейтаграммами, мс	Продолжительность эксперимента, с	Дейтаграмм	
			Передано, шт.	Принято, шт.
1	8,000	15,919	2037	1866
2	4,000	15,335	3863	3506
3	2,667	15,324	5823	5287
4	2,000	15,817	7970	7255
5	1,600	15,151	9374	8437
6	1,333	15,201	11404	10306
7	1,143	15,135	13294	12002
8	1,000	15,119	15124	13432
9	0,889	10,251	11826	8859
10	0,800	10,232	12923	8866
11	0,727	10,118	13795	8712
12	0,667	10,170	15375	8778
13	0,615	10,137	16577	8781
14	0,571	10,553	18473	9233
15	0,533	10,121	19031	8718

На рисунке 3.11 представлена эмпирическая зависимость доли потерянных дейтаграмм от интенсивности трафика.

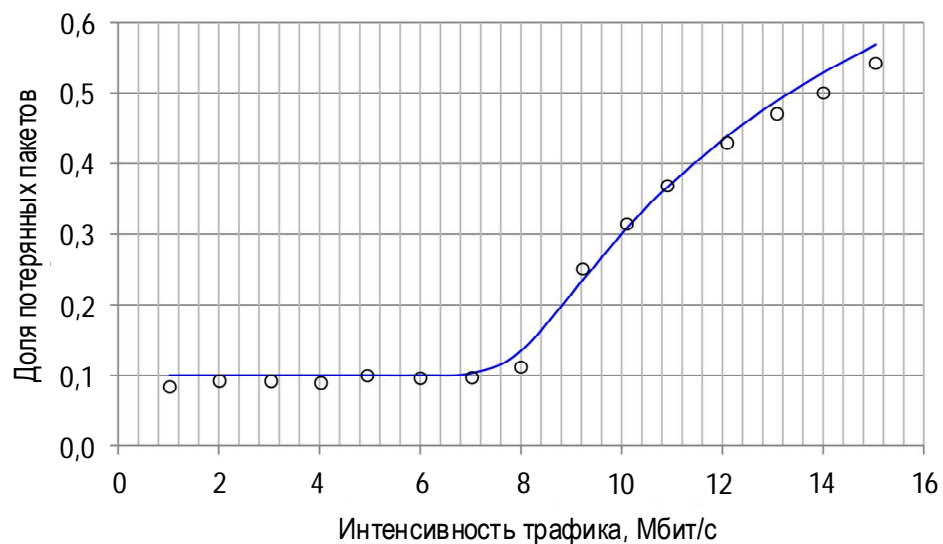


Рисунок 3.11. Зависимость доли потерянных дейтаграмм от интенсивности трафика

Данные аппроксимированы выражением:

$$p = p_0 + \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} \cdot n_b + 1}} \cdot \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} \cdot n_b}, \quad (3.3)$$

где C_a^2 и C_s^2 — квадратичные коэффициенты вариации соответственно распределений входящего потока и времени обслуживания;

n_b — размер буфера;

ρ — загрузка системы;

p_0 — вероятность потерь, зависящая от количества транзитных участков маршрута (по результатам эксперимента при 11 транзитных узлах $p_0=0,1$).

На рисунке 3.12 приведено распределение потерянных дейтаграмм по участкам маршрута. Из приведенных выше результатов видно, что качество функционирования самоорганизующейся сети, построенной с использованием технологии Wi-Fi, существенно зависит от ее параметров, в частности, от длины маршрута и интенсивности трафика.

Однако, численные значения пропускной способности и величины задержки, которые имеют место при изменении длины маршрута и интенсивности трафика в достаточно широких пределах, существенно отличаются от значений, полученных для сети, построенной с применением технологии ZigBee. Например, при проведении имитационных экспериментов величина круговой задержки RTT не превысила значения 30 мс, в наихудшем случае, а пропускная способность не снижалась ниже, чем 2 Мбит/с.

Из этого можно сделать вывод, что использование стандартов Wi-Fi для построения беспроводных сенсорных сетей, в ряде случаев, приемлемо для многих приложений ДР.

Полученные зависимости параметров функционирования от длины маршрута, позволяют выбрать наиболее подходящую конфигурацию сети, в которой как длина маршрута, так и параметры функционирования удовлетворяют требованиям решаемых прикладных задач.



Рисунок 3.12. Распределение количества потерянных дейтаграмм по участкам маршрута

3.2 Исследование передачи мультимедиа контента на основе технологии BLE 5.0 в ячеистой сети

В настоящее время большой популярностью пользуются концепции ИВ и приложения ДР [90], которые представляют собой интеграцию большого объёма информации о реальных объектах из окружающего нас мира [91-93]. Приложения ДР, как правило, добавляют вспомогательную информацию об объекте, который сначала распознаётся и идентифицируется путём отправки данных на удалённый сервер. В зависимости от приложения информация, поступающая на и/или от сервера, может отличаться. Например, в одну сторону может идти полноценный видеопоток, а в обратную только текстовые данные, в которых содержатся метаданные об объекте. Смартфоны, планшеты и прочие умные устройства, относящиеся к пользовательскому оборудованию сети подвижной связи, являются идеальным аппаратным обеспечением для реализации приложений ДР. Такие устройства поддерживают высокоскоростное соединение с Интернетом, обладают мощным процессором и камерой, графическим интерфейсом, и при этом, приемлемой ценой, доступной любому пользователю.

Многие приложения ДР могут быть реализованы на самом умном устройстве, поскольку не требуют сложной обработки данных. Как правило, основной

функцией является распознавание объекта через внешнюю камеру и выведение информации (отображение) о нем. Однако, есть и такие приложения дополненной реальности, которым требуется достаточно мощная обработка данных как на самом устройстве, так и на облачных серверах. Доставка данных на облачные сервера должна осуществляться по каналам с высокой пропускной способностью, чтобы исключить сетевые задержки. В крупных городах с большой плотностью пользователей и их постоянно высокой активностью реализовать представление различных услуг ДР с надлежащим качеством восприятия (на англ. Quality of experience (QoE)) может быть довольно сложной задачей. Одним из вариантов решения данной задачи является использование D2D коммуникаций [94]. Основой для D2D коммуникации может стать стандарт Bluetooth Low Energy 5.0, который обладает рядом преимуществ [96]. Во-первых, обеспечивает пропускную способность 2 Мбит/с, во-вторых, работает на расстоянии 70–100 м, и в-третьих, обладает свойством самоорганизации.

3.2.1 Обзор Bluetooth Low Energy 5.0 и BLE mesh

Сегодня технология Bluetooth Low Energy является одной из самых популярных беспроводных технологий в персональных сетях. До сих пор разные версии протокола Bluetooth используется во многих сферах жизни на различных устройствах. Каждая новая версия протокола (1.2, 2.0, 2.1, 3.0, 4.0, 4.1, 4.2, 5.0, 5.2) вносит существенные улучшения в его работу. Важным достижением является поддержка режима работы с низким энергопотреблением, начиная с версии 4.0 (Bluetooth Low Energy — BLE). Недавно вышла новая версия 5.0 [88], в которой улучшены характеристики скорости передачи данных, радиус действия, энергоэффективность, и способ самоорганизации сети. Особо следует выделить следующие новые возможности технологии Bluetooth 5.0, которые отличают её от предыдущих версий:

- Увеличение пропускной способности широковещательного сообщения в 8 раз.
- Увеличение скорости передачи данных в 2 раза.

- Увеличение дальности в 4 раза.
- Улучшение помехоустойчивости.
- Улучшение энергоэффективности.
- LE-рекламные расширения (Advertising Extensions).

На физическом уровне BLE 5.0 используется различные схемы модуляции, схемы кодирования и скорости передачи данных. Данные физического уровня представлены в таблице 3.3.

Теперь максимальная скорость передачи данных удваивается до 2 Мбит/с. Вместе с параметрами функционирования, представленными в BLE 4.2, пропускная способность увеличена в 5 раз по сравнению с исходным уровнем BLE 4.0. В новой версии BLE 5.0 также поддерживается Bluetooth mesh, которая дает больше возможностей для взаимодействия между несколькими устройствами. Bluetooth mesh была выпущена независимо и после выпуска спецификации BLE 5.0, что предполагает поддержку предыдущих версий технологии BLE.

Таблица 3.3 – Физический уровень BLE 5.0

Физический уровень	Схема модуляции	Схема кодирования		Скорость передачи данных
		Заголовка доступа	Полезной нагрузки	
LE 1M	1 Мсимв/с	некодированная	некодированная	1 Мбит/с
LE 2M	2 Мсимв/с	некодированная	некодированная	2 Мбит/с
LE Coded	1 Мсимв/с	S = 8	S = 8	125 кбит/с
			S = 2	500 кбит/с

В июле 2017 года группа Bluetooth SIG (The Bluetooth Special Interest Group) опубликовала первую версию спецификации профиля ячеистой сети для Bluetooth [87]. В ней определяется структура ячеистой сети на основе управляемого потока (на англ. flooding-based solution), которая использует широкоэмиттерные каналы для передачи сообщений, чтобы другие узлы могли их получать и ретранслировать. Любое устройство в сети может отправлять сообщения в любое время, пока существует достаточная плотность устройств для прослушивания и ретрансляции

сообщений. Для ограничения количества ретрансляции сообщений существует несколько методов, представленных в спецификации [87]. Основными методами являются:

- **Время жизни (Time To Live - TTL):** TTL используется во всех сообщениях для управления количеством переходов, по которым будет передаваться сообщение.
- **Кэш сообщений (Message Cache):** кэширование сообщений реализуется всеми узлами и используется для предотвращения повторного передачи недавно переданных сообщений.
- **Ретрансляция не обязательна (Relay is optional):** всем узлам не требуется реализовать функцию ретрансляции.

	1		1	3	2	2	12 or 16	4 or 8
M	Network ID	CTL	TTL	Sequence Number	Source Address	Dest Address	Packet Payload	NWK MIC

Рисунок 3.13. Формат пакета ячеистой сети Bluetooth

В спецификации [87] определяется размер пакета, он составляет 33 байта. Формат пакета изображён на рисунке 3.13. В каждый пакет включает в себя 12 или 16 байт полезной нагрузки. Если объем полезной нагрузки превышает 12 или 16 байт, возможен процесс сегментации и повторной сборки. Следовательно, для передачи сообщения размером 120 байт, нужно сегментировать сообщение на 10 пакетов. Объединение возможностей BLE 5.0 и ячеистой сети стало новым решением для предоставления различных услуг. В следующем разделе мы рассмотрим использование BLE 5.0 Mesh для приложений ДР.

3.2.2 Модель приложения дополненной реальности с использованием BLE 5.0 Mesh

Современное пользовательское оборудование сети подвижной связи как правило оснащены радиомодемом BLE 5.0. Таким образом, пользовательское оборудование сети подвижной связи может образовывать сеть с соседними узлами и передавать сообщения между несколькими устройствами. С учетом

рассмотренных выше особенностей BLE 5.0, предлагаем следующую модель предоставления услуг ДР, структура которой изображена на рисунке 3.14.

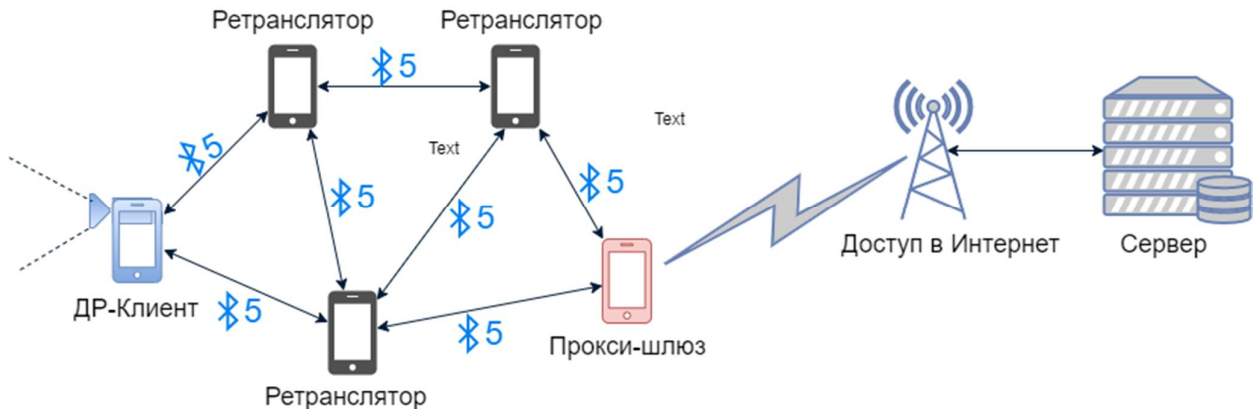


Рисунок 3.14. Модель ячеистой сети BLE 5.0 для приложения ДР

ДР-Клиент: узел, который с помощью камеры распознает объекты и передает запросы на сервер для поиска информации об объекте в базе данных. Кроме этого, с помощью датчика GPS и датчиков ориентации в пространстве (акселерометр, гироскоп, барометр) ДР-Клиент может определить местоположение в пространстве. После получения ответа от сервера информация отображается на устройстве. ДР-Клиент передает сообщения по широкополосным каналам другим устройствам.

Ретранслятор: узлы, которые принимают сообщения и затем ретранслируют их по широкополосным каналам, если эти сообщения не приходили раньше. На этих узлах применяются методы кэширования сообщений и механизмы TTL.

Прокси-шлюз: узел, у которого есть доступ в сеть Интернет. Он обеспечивает обмен данными между AR-Клиентом и удаленным сервером.

Доступ в Интернет: предоставляет доступ в Интернет.

Сервер: принимает запросы ДР-клиентов и после обработки, отправляет ответы обратно.

Таким образом, время ожидания между моментами отправления запроса клиентом и получения ответа от сервера является одним из основных показателей качества предоставления услуги, а также качества восприятия контента конечным пользователем. Перед тем, как отправить запрос, пользовательское оборудование сети подвижной связи также затрачивает время на распознавание окружающих

объектов. Таким образом, это суммарное время может влиять на качество восприятия пользователя. Из рисунка 3.14 видно, что время ожидания зависит от нескольких составляющих, а именно, абонентских терминалов, сети связи и облачного сервера. При реализации конкретной услуги более подробно рассматриваются влияние каждого элемента модели предоставления услуги. Задержка, вносимая терминалами, зависит от характеристик устройств и функций самого приложения ДР. Задержка, вносимая сетью связи, зависит от используемых технологий и протоколов передачи данных, пропускной способности сетей и объёма передаваемых данных. В ячеистой сети BLE небольшая пропускная способность, а также малый объём полезной нагрузки? Но достаточно большой объём служебной информации, который позволяет поддерживать ячеистую архитектуру сети. Задержка, вносимая облачным сервером, зависит от его производительности при обработке данных.

Ячеистая сеть BLE позволяет передавать небольшие объёмы данных, в то время как при передаче сообщения большего размера требуется сегментации и повторная сборка пакетов на приеме. Также в данной сети пакеты ретранслируются через узлы к источнику (шлюзу), следовательно, масштаб сети или количество транзитных узлов будет влиять на задержку доставки между клиентом и сервером. Таким образом, задержка, вносимая сетью, больше всего влияет на качество передачи при реализации услуги. Рассмотрим задержку, включая время, требуемое для доставки пакетов между клиентом и шлюзом через определённое количество узлов ретрансляторов, и время, требуемое для доставки сообщения между шлюзом и сервером через сеть подвижной связи. Опишем процесс обслуживания ДР-Клиента моделью многофазной СМО. Каждый узел ретранслятора, шлюз и облачный сервер представляются собой одну фазу обслуживания.

Допустим, что потоки пакетов, поступающие на каждую фазу обслуживания, можно описать моделью простейшего потока. Ячеистая сеть BLE [87] использует метод маршрутизации на основе управляемого потока (flooding-based). Потоки пакетов передаются через множество узлов к другим узлам. В каждый ретранслятор может поступать одно и то же сообщение. При достаточно большом

количестве пользователей, поступающий поток пакетов, будет обладать свойствами близкими к простейшему потоку. Модель системы обслуживания представлена на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15. Модель системы массового обслуживания ДР-Клиента

Предполагаем, что ДР-Клиент передает сообщение размером 120 байт, следовательно, это сообщение сегментируется на 10 пакетов. Как видно на рисунке 3.15, процесс передачи данных между ДР-Клиентом и сервером можно описать следующим образом:

— Каждый пакет последовательно передается к узлу Ретранслятор-1 со средним временем доставки T_1 .

— Затем узел Ретранслятор-1 ретранслирует пакеты к узлу Ретранслятор-2. Средним временем доставки между первым и вторым узлами является T_2 . Для обеспечения большей надёжности доставки, узел Ретранслятор-1 может быть сконфигурирован так, чтобы повторять ретрансляцию одного и того же пакета [87]. Обычно узел Ретранслятор повторяет ретрансляцию пакета 3 раза с минимальной задержкой повторения, которая называется интервалом повторной передачи: $Interval_{retrans} = (Steps + 1) * 10 + (0 \rightarrow 10ms)$, где $Steps = 1, 2, 3$.

— Аналогично для следующих узлов Ретранслятор $-i$ существуют время передачи T_i и интервалы повторной передачи $Interval_{retrans}$.

— После того, как шлюз получил все 10 пакетов, он собирает сегментированные пакеты в одно сообщение. Затем полученное сообщение отправляется серверу.

В такой системе обслуживания большой интерес представляет модель, которая описывает принципы функционирования её элементов. Очевидно, что при исследовании в различных моделях требуется определять время задержки для

доставки данных ДР, т.е. нужно определить вероятность того, что время доставки данных не превысит некоторого значения T_0 . В настоящее время известны модели для типичных систем массового обслуживания [97], например, когда время обслуживания на каждом узле или на каждой фазе случайно и имеет экспоненциальное распределение вероятности. При описании модели СМО вида М/М/1 для каждой из фаз среднее время прохождения пакета на i -й фазе представлено следующим выражением (3.4):

$$T_i = \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} \quad (3.4)$$

В случае, когда поступающие потоки пакетов на каждую фазу СМО независимы и обладают одинаковыми свойствами (простейший поток), среднее время доставки равно сумме среднего времени прохождения каждой из фаз СМО. Также при доставке сообщения большего размера надо учитывать время доставки пакетов, которые получены после сегментации. Таким образом среднее время доставки данных между ДР-Клиентом и сервером представляется как формула (3.5):

$$T = m \cdot \sum_{i=1}^n T_i + T_s = m \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} + \frac{1}{\mu_s - \lambda_s}, \quad (3.5)$$

где m — число пакетов после сегментации сообщения,

n — число проходящих фаз СМО до сервера,

μ_i и μ_s — интенсивность обслуживания на каждой из фаз ретрансляторов и сервера,

λ_i и λ_s — интенсивность поступающих пакетов на каждой из фаз ретрансляторов и сервера.

Допустим, что интенсивность поступающих пакетов на каждом узле Ретранслятор одинакова. Из формулы (3.5) следует, что время доставки данных между ДР-Клиентом и сервером представлено как:

$$T = \frac{m \cdot n}{\mu_i - \lambda_i} + \frac{1}{\mu_s - \lambda_s} \quad (3.5)$$

3.2.3 Моделирование и результаты

В данном разделе представлены результаты имитационного моделирования в пакете AnyLogic, которое было разработано в рамках проводимого исследования [95]. Модель построена аналогично представленной на рисунке 3.15. В процессе моделирования изменяется количество транзитных узлов Ретранслятор, т.е. изменяется количество фаз СМО, проходимых (переходы) от клиента до сервера. В качестве условий экспериментов были выбраны следующие параметры: время проведения каждого эксперимента, $t_{\text{exp}} = 100\text{с}$; скорость передачи по BLE 5.0, $DR = 1\text{Мбит/с}$ и $DR = 2\text{Мбит/с}$; размер сообщения (полезная нагрузка), $L = 120\text{байт}$ и $L = 240\text{байт}$; интенсивность поступающих пакетов на каждый узел BLE, $\lambda_i = 0.7$; интенсивность обслуживания на каждом узле BLE для типа PHY 2Mbps и 1Mbps , $\mu_i = 1.1$ и $\mu_i = 0.97$; интенсивность поступающих пакетов на сервер, $\lambda_s = 2.08$; интенсивность обслуживания на сервере, $\mu_s = 1$.

При изменении количества транзитных узлов от клиента до сервера, измерялись значения таких параметров, как время доставки всех сегментированных пакетов между клиентом и шлюзом, и время доставки сообщений между шлюзом и сервером. По сумме этих времён можно оценить время доставки данных между клиентом и сервером. Измерения данных параметров проведены при доставке сообщений размерами 120 и 240 байт.

При моделировании доставки сообщения размером 120 байт изменялся коэффициент загрузки, соответственно изменялась интенсивность поступающих пакетов на каждой из фаз СМО, а также измерялось время доставки между клиентом и сервером.

В качестве результатов моделирования было получены графики зависимостей задержки доставки пакета от количества транзитных узлов Ретранслятор, от размера передаваемого сообщения и от коэффициента загрузки. Теоретически по формуле (3.5) также были получены аналогичные зависимости для этих параметров, представленные на рисунках 3.16, 3.17.

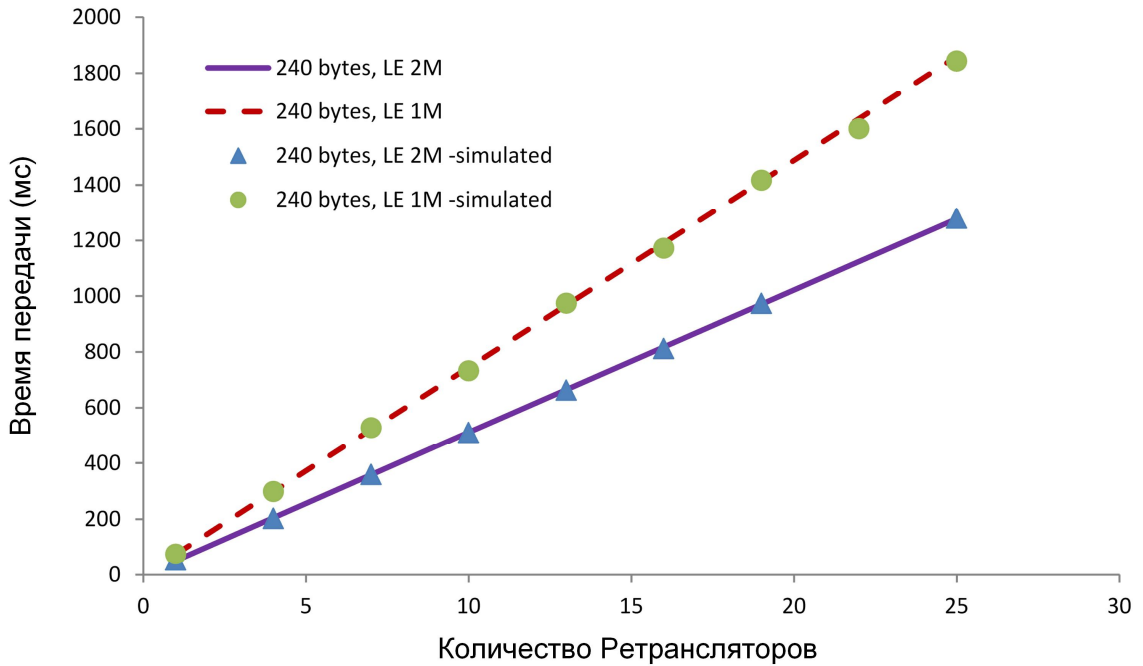


Рисунок 3.16 – Время передачи в зависимости от количества Ретрансляторов

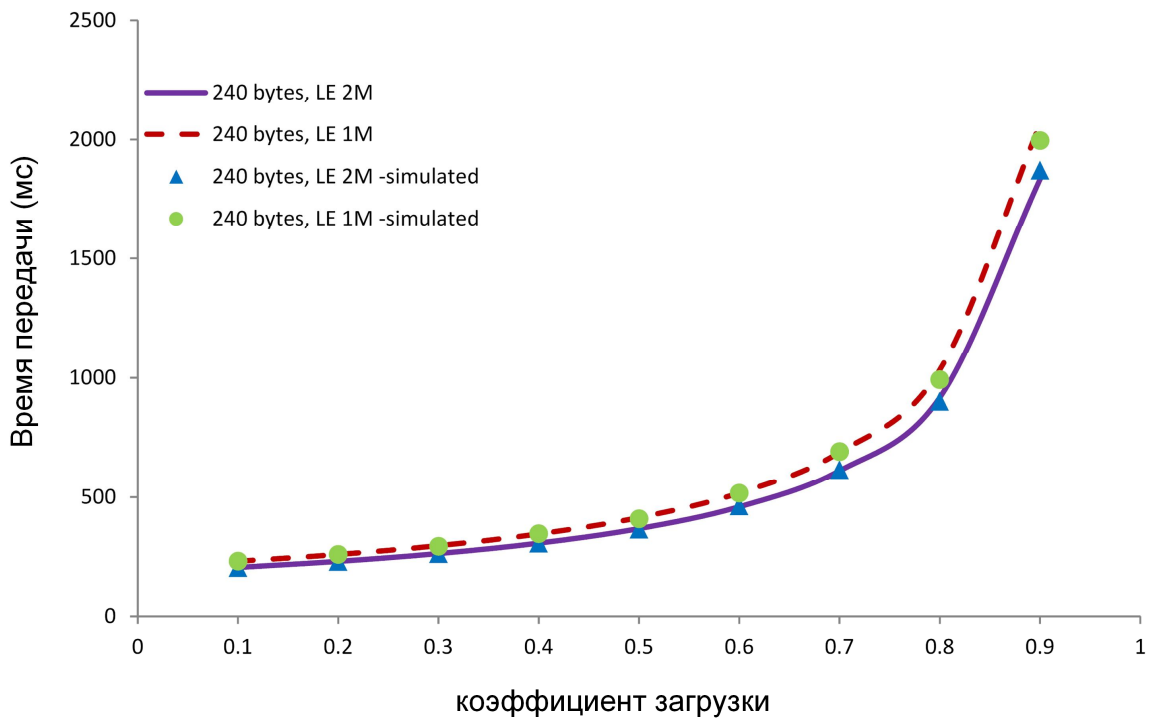


Рисунок 3.17 – Время передачи в зависимости от коэффициента загрузки

Результаты имитационного моделирования изображены на рисунках 3.18, 3.19.

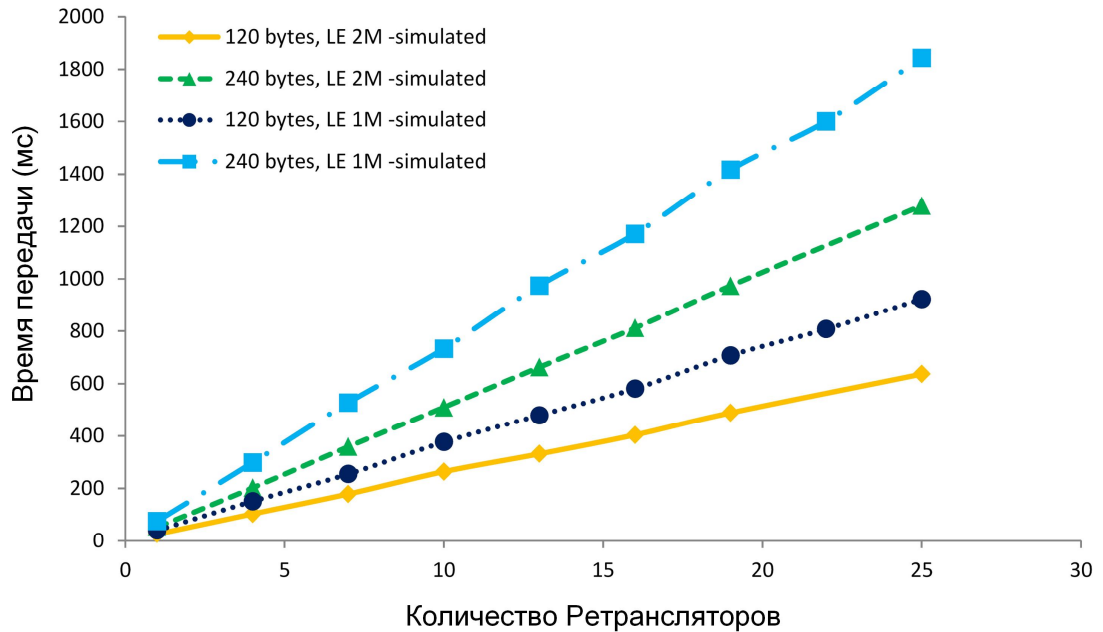


Рисунок 3.18 – Время передачи в зависимости от количества Ретрансляторов (AnyLogic)

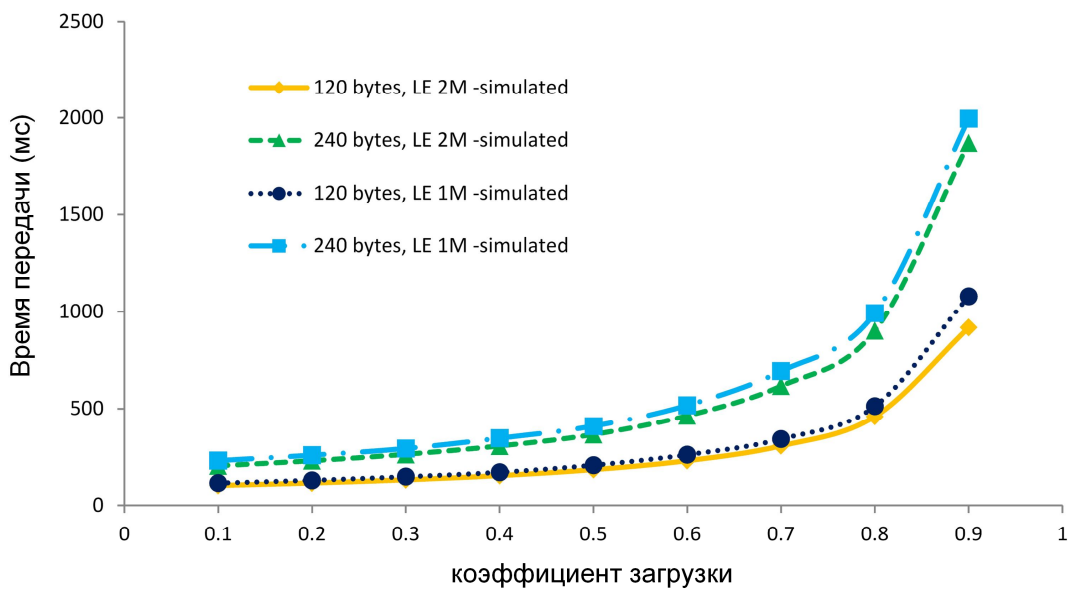


Рисунок 3.19 – Время передачи в зависимости от коэффициента загрузки (AnyLogic)

Из рисунков видно, что в данном случае время доставки линейно увеличивается с изменением количества Ретранслятор. Результаты теоретических расчетов подтверждают результаты, полученные в ходе имитационного моделирования. На рисунках 3.16, 3.18 видно, что время передачи сообщения размером 240 байт составляет 1.8 секунды при использовании режима LE 1M (PHU

1 Mbps), и 0.9 секунды при использовании режима LE 2M (PHY 2 Mbps), в случае, когда имеется 25 Ретрансляторов между ДР-Клиентом и сервером. В последней версии спецификации модели ячеистой сети BLE была определена полезная нагрузка размером до 16 байт, т.к. доставка сообщения происходит с сегментацией данных, поэтому время доставки сообщения потребует больше. Таким образом очевидно, что размер сообщения влияет на время доставки между ДР-Клиентом и облачным сервером. При сравнении двух сообщений с размерами 120 и 240 байт, видно, что время доставки сообщения с размером 120 байт меньше в 2 раза. Поэтому при реализации услуг ДР требуется определить объём данных для доставки к ДР-Клиентам. На графиках 3.17 и 3.19 показано влияние коэффициента нагрузки на время передачи сообщения между ДР-Клиентом и облачным сервером при количестве Ретрансляторов равном 10. Результаты на данных рисунках показывают, что время доставки сообщения размером 240 байт больше 2 секунд при коэффициенте нагрузки 0.9, а для доставки сообщения размером 120 байт требуется больше 1 секунды. Таким образом, при большой плотности пользователей время доставки данных может достигать нескольких секунд. В рассмотренной сети при большом количестве Ретрансляторов и большой нагрузке качество предоставления услуги может не обеспечиваться надлежащим образом. Поэтому анализируя полученные результаты можно выбрать подходящий вариант доставки, учитывая масштаб сети, количество Ретрансляторов, объём предоставленных данных для реализации конкретного приложения ДР.

3.3 Метод передачи голосового трафика с использованием БПЛА в быстросворачиваемых летающих сетях при стихийных бедствиях

В условиях разрушенной инфраструктуры сетей подвижной связи, а также для предоставления традиционных услуг сетей подвижной связи в лесах или после стихийного бедствия предлагается использовать БПЛА в качестве мобильных базовых станций. На сегодняшний день большинство терминалов сети подвижной связи поддерживают технологии Wi-Fi IEEE 802.11a/n/ac. Одним из новых видов услуг является передача голоса поверх Wi-Fi на базе приложений Voice over Wi-Fi

(VoWi-Fi), что создает возможность обеспечить покрытие заданной территории Wi-Fi и тем самым реализовать возможность осуществления голосовых вызовов. В данном разделе будет рассмотрен именно такой подход для обеспечения связи в районах стихийных бедствий.

3.3.1 Архитектура быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика с использованием БПЛА при стихийных бедствиях

Как говорилось ранее, предполагаем, что все телекоммуникационная инфраструктура в зоне стихийного бедствия разрушена. Традиционные сети GSM, которые используются для голосовой связи, предполагают использование базовых станций, массогабаритные параметры которых не позволяют эксплуатировать их на БПЛА. Кроме этого, доставка новых базовых станций в район стихийного бедствия, как правило, является логистической задачей. Таким образом, организация связи с мобильными абонентами не может быть решена на базе технологии GSM. Одним из эффективных решений, на сегодняшний день является взаимодействие с абонентами сетей подвижной связи GSM сети через Wi-Fi на базе приложений VoWi-Fi [98–100]. Для реализации этого подхода необходимо, чтобы осуществлялось полное покрытие территории стихийного бедствия радиосигналом Wi-Fi. Для достижения этой цели предполагается использовать летающую сеть, состоящую из множества БПЛА, которые являются мобильными точками доступа и осуществляющие ретрансляцию принятых/переданных данных к базовой станции [101, 106–108], которая функционирует в штатном режиме. Данный подход позволит организовать иерархическую беспроводную Ad-hoc-сеть с мобильными узлами. Роль базовой станции для абонентов будет выполнять Wi-Fi точка доступа на борту БПЛА, которая поддерживает IEEE 802.11n или IEEE 802.11ac. Ввиду того, что технология VoWi-Fi получила распространение в большом количестве различных моделей пользовательского оборудования сети подвижной связи, можно предположить, что данный подход позволит совершать звонки по Wi-Fi при организации летающей сети с поддержкой данной технологии. Также стоит отметить, что все звонки осуществляются через оператора с сохранением нумерации и идентификации абонентов сетей мобильной связи.

На рисунке 3.20 представлена архитектура летающей сети для экстренных служб, в которой в качестве летающего сегмента предполагается использовать один или несколько БПЛА. На данном рисунке отражена концепция организации связи и взаимодействия всех элементов системы.

Согласно рисунку 3.20 архитектура голосовой службы через Wi-Fi представлена следующими сегментами:

— Наземный сегмент: этот сегмент включает пользовательское оборудование сети подвижной связи, которые имеют некоторые сетевые интерфейсы, такие как Bluetooth, Wi-Fi, GSM, LTE/4G и т.д. На приемлемом расстоянии абонентские терминалы могут взаимодействовать напрямую друг с другом, например, связь между устройствами (D2D Communication). В настоящее время известны некоторые беспроводные технологии, такие как Bluetooth, Wi-Fi Direct, Wi-Fi Hotspot, которые позволяют осуществлять обмен данными между двумя устройствами в качестве связи D2D. При использовании таких технологий расстояние связи ограничено. Поэтому для обеспечения связи между двумя абонентами, которые находятся на большом расстоянии, предлагается активная связь между несколькими ретрансляторами, в нашем случае БПЛА является ретранслятором, у которого различные беспроводные интерфейсы. В этом случае абонентские терминалы с поддержкой технологий IEEE 802.11n/ac являются Wi-Fi станциями. Таким образом, технологии IEEE 802.11n/ac обеспечивают подключение терминалов подписки к летающему сегменту.

— Летающий сегмент: этот сегмент построен на основе сетей БПЛА, которые также поддерживают несколько сетевых интерфейсов, таких как IEEE 802.11p, IEEE 802.11n/ac и беспроводная телеметрия. В этой архитектуре летающий сегмент должен обеспечивать связь с наземным сегментом, связь между БПЛА и связь с центром оператора. Рисунок 3.20 показывает, что наземный сегмент и летающий сегмент связаны с использованием технологии IEEE 802.11n/ac, а связь между БПЛА используется с технологией IEEE 802.11p.

— Сегмент оператора: в этом сегменте, существует связь между группой БПЛА и центром операторов, который определяет доступ абонентских терминалов

к услуге, т.е. существует ли возможность связи с другим абонентом. Каждый абонентский терминал должен быть идентифицирован в центре оператора. Один из группы БПЛА доступен к базовой станции через беспроводную технологию IEEE 802.11p, как показано на рисунке 3.20.

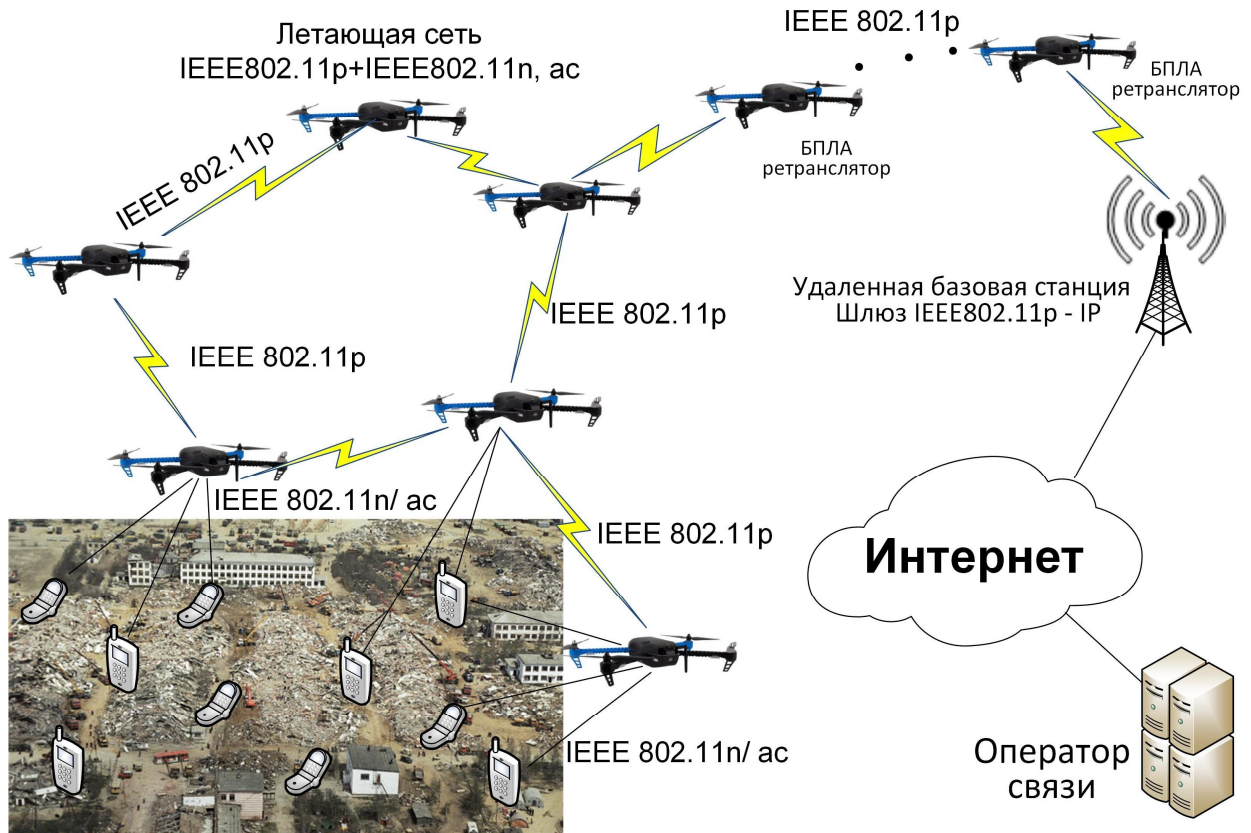


Рисунок 3.20 – Архитектура летающей сети для экстренных случаев для передачи голосового трафика

3.3.2 Модель системы обслуживания быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика с использованием БПЛА при стихийных бедствиях

Идея многофазовой системы обслуживания в данном случае, состоит в том, чтобы в зоне стихийного бедствия, все инфраструктуры разрушены, абоненты не могут звонить через сети связи общего пользования пользовательским оборудованием сети подвижной связи. С помощью БПЛА, в которой закреплен гетерогенный шлюз, обеспечивающий технологию Wi-Fi, абоненты смогут позвонить ко всем абонентам в зоне покрытия БПЛА. Каждый БПЛА играет роль транслятора голоса.

Сделаем допущение, что в зоне стихийного бедствия абонент 1 хочет позвонить абоненту 2 через VoWi-Fi с помощью группы БПЛА. Примером такого звонка может быть связь сотрудника экстренной службы с абонентами, находящимися в зоне стихийного бедствия. Согласно алгоритмам работы пользовательского оборудования сети подвижной связи, в случае отсутствия связи с базовой станцией оборудование переходит в режим сканирования доступных сетей. Сканирование эфира в районе стихийного бедствия позволит выявить абонентов, которые потенциально могут находиться под завалами в ожидании помощи.

Первоначально процесс установления соединения для совершения звонка между двумя абонентами проводится оператором, т.е. каждый БПЛА связан с оператором сетей подвижной связи, что позволяет получить данные абонентов. Согласно схемы взаимодействия звонок может быть выполнен только после того, как оператор послал подтверждение соединения. После этого звонок между двумя абонентами будет выполняться через цепочку БПЛА, взаимодействующих друг с другом. В данной работе, рассматривается процесс передачи голосового трафика от абонента 1 к абоненту 2 после установки соединения. Для совершения звонка с приемлемым качеством восприятия, необходимо обеспечить задержку передачи голоса не больше 100 мс [109]. Летающая сеть, состоящая из БПЛА представлена как многофазная система массового обслуживания (СМО) [13, 14] (рисунок 3.21). Согласно рисунка каждый БПЛА получает, обрабатывает и отправляет данные абонента и голосовой трафик к следующему узлу БПЛА на основе обмена служебными сообщениями. Допускается, что входящие потоки в каждый БПЛА имеют одинаковое свойство. Из этого можно рассчитать среднее время доставки для каждой подсистемы СМО по рассматриваемым моделям. Для простоты рассматриваются две модели $M/M/1$ и $G/G/1$. Модель СМО с n фазами обслуживания приведена на рисунке 3.22.

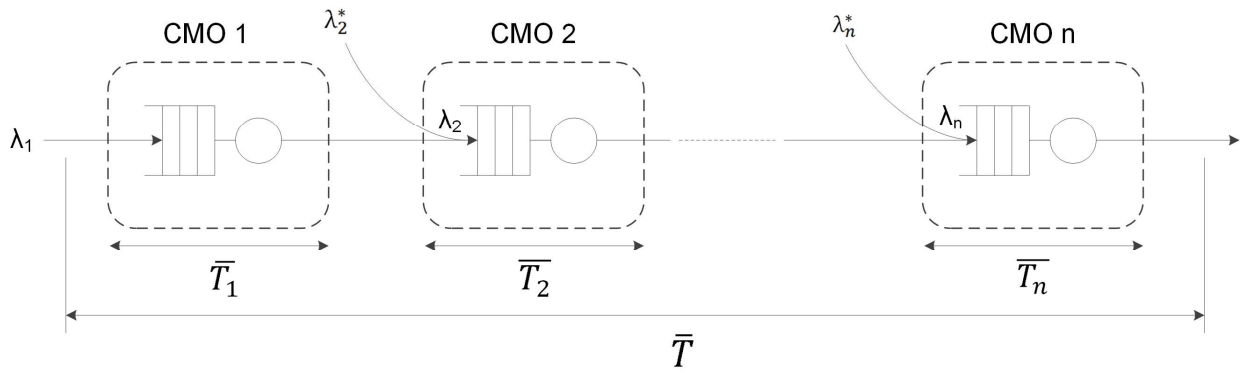


Рисунок 3.21 – Структура модели СМО

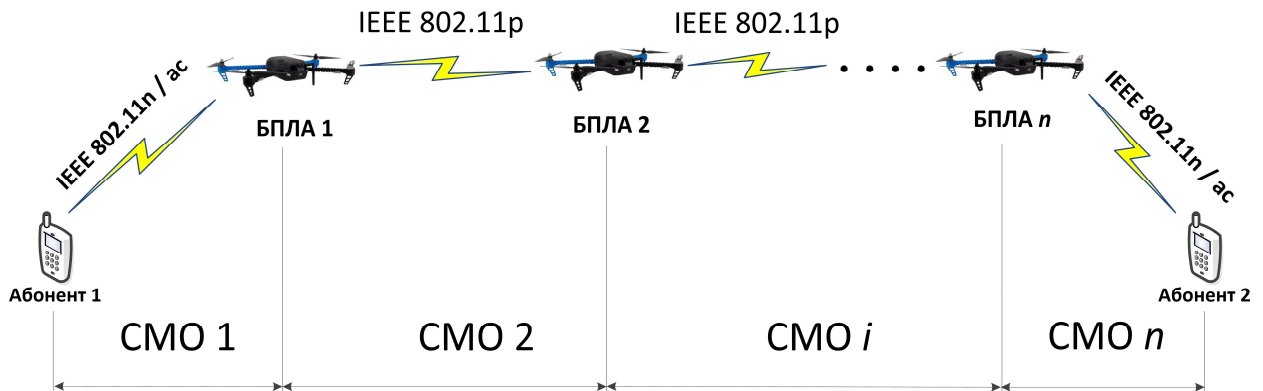


Рисунок 3.22 – Структура модели СМО быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голоса с использованием БПЛА в экстренных случаях

Рисунок 3.22 показывает, что задержка передачи голосового трафика от абонента 1 к абоненту 2 представляется суммой всех средних времени доставки на всех фазах и изображена в формуле (3.6):

$$\bar{T} = \bar{T}_1 + \sum_{j=1}^N \bar{T}_j + \bar{T}_n, \quad (3.6)$$

Где \bar{T} — сумма средних времени доставки на всех фазах.

\bar{T}_1 — среднее время доставки в первой фазе (между абонентом 1 и БПЛА 1) (мс).

\bar{T}_j — среднее время доставки между БПЛА (мс).

\bar{T}_n — среднее время доставки в последней фазе (между БПЛА n и абонентом 2) (мс).

N — Количество БПЛА.

Согласно формулы (3.6) можно рассчитать количество БПЛА, которые могут обеспечить время доставки голосового трафика между двумя абонентами с

задержкой, не превышающей 100 мс. Соответственно, $\bar{T} = \bar{T}_1 + \sum_{j=1}^N \bar{T}_j + \bar{T}_n \leq 100 \text{ мс}$.

Допускается что времена доставки между абонентами и БПЛА одинаковы ($\bar{T}_1 = \bar{T}_n$), и времена доставки между БПЛА также одинаковы. Следовательно, получает количество БПЛА, которое выполняется согласно неравенству (3.7):

$$2 \cdot \bar{T}_1 + (n-1) \cdot \bar{T}_j \leq 100 \Rightarrow n \leq \frac{100 - 2 \cdot \bar{T}_1}{\bar{T}_j} + 1 \quad (3.7)$$

Интенсивность нагрузки системы считается по формулу (3.8):

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}, \quad (3.8)$$

Где λ_i — Интенсивность поступающих заявок (заявок/мс);

ρ_i — Интенсивность обслуживающих заявок (заявок/мс);

$t_i = \frac{1}{\mu_i}$ — средняя продолжительность обслуживающих заявок (мс).

При рассмотрении двух систем массового обслуживания M/M/1 и G/G/1, используются известные формулы для вычисления времени пребывания заявки в системе [110]. Формулы (3.7) и (3.8) показывают среднее время доставки, проходящее через СМО- i для моделей M/M/1 и G/G/1.

Для системы M/M/1, среднее время доставки считается с помощью формулы (3.9):

$$\bar{T}_i = \bar{w}_i + \bar{t}_i = \frac{\bar{t}_i}{1 - \rho_i} + \bar{t}_i, \quad (3.9)$$

где \bar{T}_i — среднее время доставки в фазе i (мс);

\bar{w}_i — среднее время ожидания в очереди(мс);

\bar{t}_i — средняя продолжительность обслуживающих заявок (мс).

Для системы G/G/1, среднее время доставки считается с помощью формулы (3.10):

$$\bar{T}_i = \bar{w}_i + \bar{t}_i \approx \frac{\rho_i \cdot \bar{t}_i}{2 \cdot (1 - \rho_i)} \cdot \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{(\bar{t}_i)^2} \right) \cdot \left(\frac{(\bar{t}_i)^2 + \sigma_b^2}{a^2 + \sigma_b^2} \right) + \bar{t}_i, \quad (3.10)$$

где \bar{T}_i — среднее время обслуживания во фазе i (мс);

\bar{w}_i — среднее время ожидания в очереди (мс);

\bar{t}_i — средняя продолжительность обслуживающих заявок (мс);

σ_a^2 — дисперсия интервала времени между поступающими заявками;

σ_b^2 — дисперсия времени обслуживания;

a — средняя длина интервал времени между поступающими заявками.

Для передачи голоса между абонентами и БПЛА используем технологию передачи данных IEEE 802.11n (со скоростью $b_n=300\text{Мбит/с}$) или IEEE 802.11ac (со скоростью $b_{ac}=650\text{Мбит/с}$), а для передачи между БПЛА используем технологию передачи данных IEEE 802.11p (со скоростью $b_p=12\text{Мбит/с}$). Как известно средняя продолжительность обслуживающих заявок еще считается с помощью этой формулы (3.11):

$$\bar{t}_i = \frac{L}{b_i}, \quad (3.11)$$

где L — Средняя длина одного пакета (бит);

b_i — скорость передачи данных (бит/мс).

3.3.3 Результаты математического моделирования

С использованием формул (3.6), (3.9), (3.10), (3.11) получаем времена доставки голосового трафика при изменении количества БПЛА до момента, когда время доставки превышает 100 мс, это означает недопускаемое условие качества обслуживания при передаче голоса. Результаты вычисления времени доставки голосового трафика в этом случае показывают на рисунке 3.23.

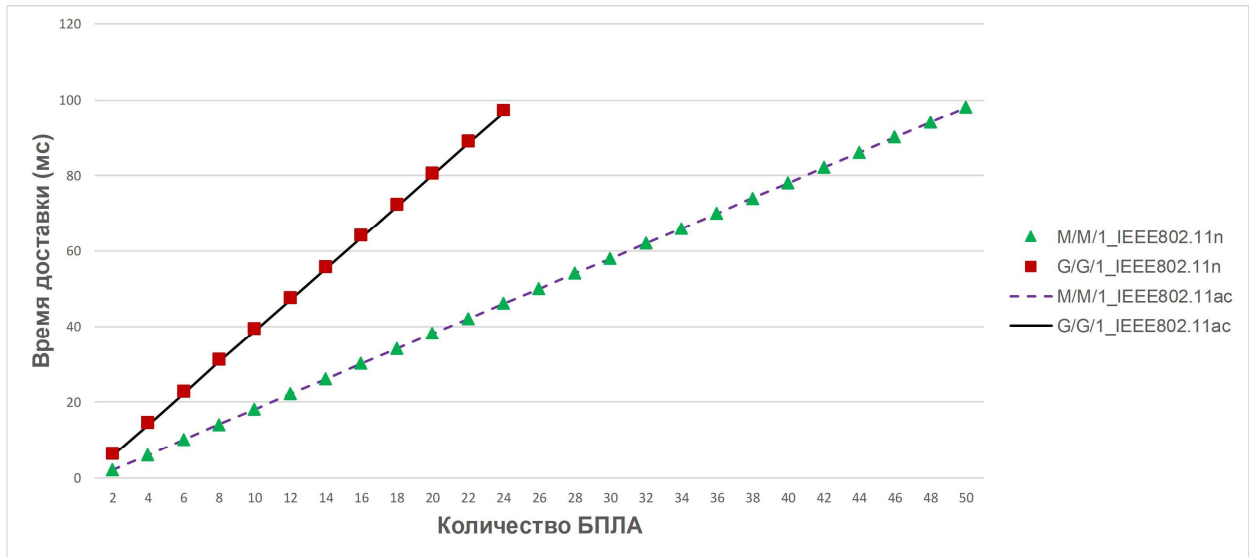


Рисунок 3.23 – Зависимость между временем доставки голосового трафика и количеством БПЛА

Также с изменением коэффициента нагрузки по формулам (3.6 - 3.11), получается максимальное количество БПЛА при использовании двух моделей. Результаты представлены на рисунке 3.24.

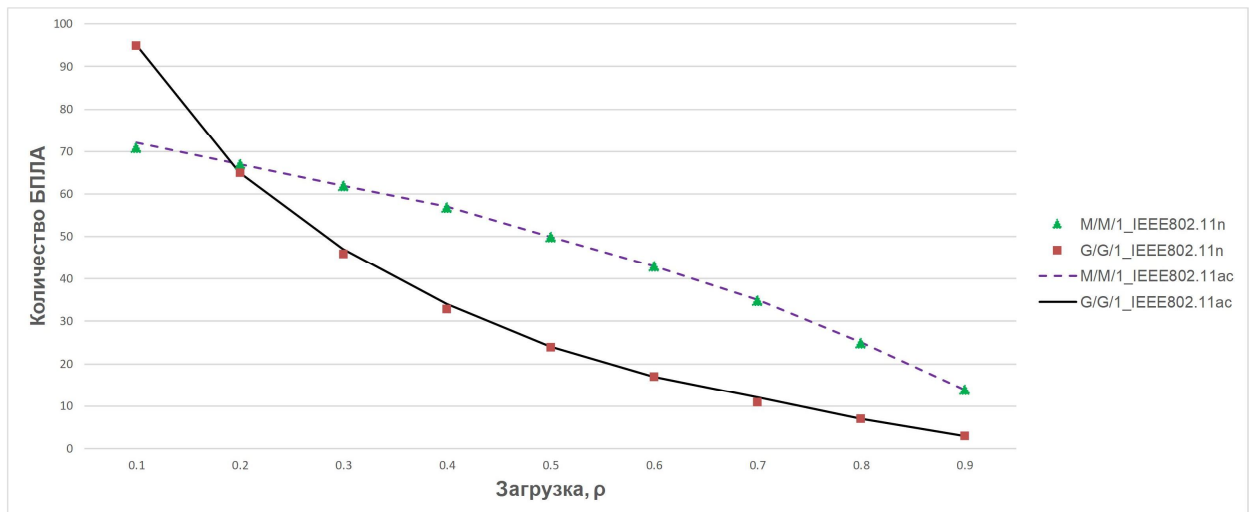


Рисунок 3.24 – Зависимость между количеством БПЛА и загрузкой системы

На рисунке 3.23 представлен расчет времени доставки голоса между абонентами при изменении количества БПЛА для двух моделей при загрузке всей системы 0.5. Согласно результатам, установлено необходимое количество БПЛА, для покрытия области стихийного бедствия. При рассмотрении двух моделей M/M/1 и G/G/1 получается большая разница с максимальным количеством БПЛА, которое может обеспечить задержку меньше 100 мс. При использовании M/M/1

получаем количество БПЛА 50 шт., что в 2 раз больше, чем при использовании модели G/G/1 — 24 шт., следовательно, зона обслуживания при увеличении количества БПЛА также расширяется. При одинаковом количестве БПЛА время задержки при доставке голосового трафика при использовании модели M/M/1 меньше, чем с использованием модели G/G/1.

Рисунок 3.24 показывает максимальное требуемое количество БПЛА при увеличении загрузки системы. Из приведенной рисунка видно, что имеется разница времени задержки при использовании технологии IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac при рассмотрении сегмента связи между абонентами и БПЛА. Количество БПЛА уменьшается с увеличением загрузки системы, а, следовательно, область зоны обслуживания для двух абонентов станет более узкой или расстояние между ними предельно близкое. Согласно данным, приведенных в рисунке, при использовании модели M/M/1 требуется 25 БПЛА при загрузке системы 0.8, а при использовании модели G/G/1 требуется 24 БПЛА при загрузке системы только 0.5.

3.4 Метод передачи голосового трафика с использованием групп БПЛА в быстроразворачиваемых летающих сетях при экстренных случаях

3.4.1 Иерархическая структура группы БПЛА в быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика при экстренных случаях

В этом подразделе предполагается использовать летающую сеть, состоящую из групп БПЛА, которые являются мобильными точками доступа и осуществляют ретрансляцию принятых/переданных данных к базовой станции, которая функционирует в штатном режиме. Оригинальность этого подхода заключается в том, что БПЛА возможно запустить быстро, тем самым ввести дополнительную мобильную базовую станцию для обеспечения связи между человеком и оператором экстренной службы. Поскольку расстояние между местом человека в лесу и местом оператора МЧС очень большое, то для обеспечения связи требуется огромное количество БПЛА в пределах прямой видимости. Также стоит учитывать, что сигнал передается через несколько скачков и в связи с увеличением сетевой задержки качество передачи голоса уменьшается. Для повышения качества обслуживания и также уменьшения необходимого количества БПЛА предлагается

разделить БПЛА на два уровня. Первый уровень будет состоять из головных БПЛА, а второй уровень из членов БПЛА в каждой группе (см. рисунок 3.25).

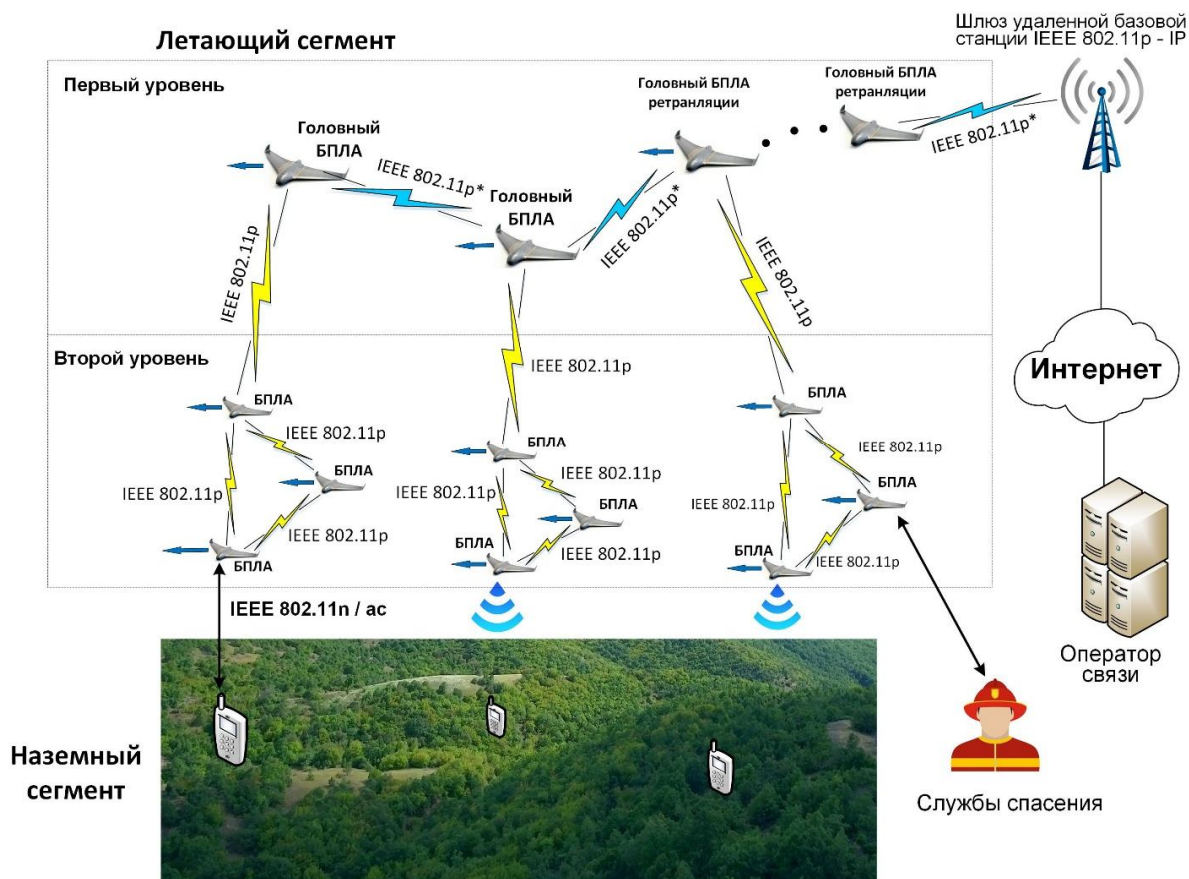


Рисунок 3.25 – Иерархическая структура быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика при экстренных случаях

БПЛА второго уровня взаимодействуют с абонентами и осуществляют поиск кратчайшего маршрута с целью передачи данных на головной БПЛА, который находится на первом уровне. Далее БПЛА первого уровня передает данные на стационарную базовую станцию через другие головные БПЛА. Таким образом, вместо передачи данных через все БПЛА сокращается количество промежуточных узлов путем введения двух уровней иерархии. Роль мобильной базовой станции для абонентов будет выполнять Wi-Fi точку доступа на борту БПЛА, которая поддерживает стандарты IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, IEEE 802.11p. Ввиду того, что технология VoWi-Fi распространена в большом количестве моделей пользовательского оборудования сети подвижной связи, можно предположить, что данный подход позволяет совершить звонки по Wi-Fi при организации летающей

сети с поддержкой данными технологиями. Также стоит отметить, что все звонки осуществляются через оператора с сохранением нумерации и идентификацией абонентов сети подвижной связи.

Предполагается, что связь между БПЛА и абонентом выполняется на базе стандарта IEEE 802.11n/ac, поскольку в настоящее время большинство пользовательского оборудования сетей подвижной связи поддерживают эти технологии. Связь между членами БПЛА в группе первой уровня и между членами БПЛА и головным БПЛА в группе второго уровня осуществляется на базе стандарта IEEE 802.11p, который был разработан для беспроводной передачи информации между транспортными средствами с поддержкой самоорганизации. Связь между головными БПЛА в различных группах выполняется с помощью технологии IEEE 802.11p* в расширенном режиме, которая может обеспечивать передачу данных на дальность до 740 м [111-114].

3.4.2 Модель покрытия для групп БПЛА

На первой стадии необходимо определить относительное положение между БПЛА и абонентом. Для этого зададим исходные данные. Предположим, что БПЛА осуществляют полет с постоянной скоростью (v); расстояние между БПЛА и абонентом равно радиусу действия выбранной технологии передачи данных – IEEE 802.11n/ac ($d = 40\text{ м}$, так как абонент находится в лесу, то расстояние распространения радиосигнала ограничено); расстояние между БПЛА, а также между членами БПЛА и головным БПЛА постоянно и равно радиусу действия выбранной технологии передачи данных — IEEE 802.11p в обычном режиме ($D = 100\text{ м}$); расстояние между головными БПЛА постоянно и равно радиусу действия выбранной технологии передачи данных — IEEE 802.11p* в расширенном режиме ($D_H = 500\text{ м}$).

Согласно рисунка 3.26, абонент может осуществлять вызовы, когда БПЛА присутствуют в зоне действия выбранных стандартов передачи данных — IEEE 802.11n/ac (точка A) и когда БПЛА перемещается до точки B , а другой БПЛА из группы осуществляет перемещение в точку A , для обеспечения непрерывной

связи. Точки A и B - самые находятся на значительном удалении, расстояние между БПЛА и абонентом более ($d = 40 м$). В таком случае высоту полета БПЛА можем рассчитать по формуле (3.12):

$$h = \frac{d}{\sqrt{2}} = 28.28(m) \quad (3.12)$$

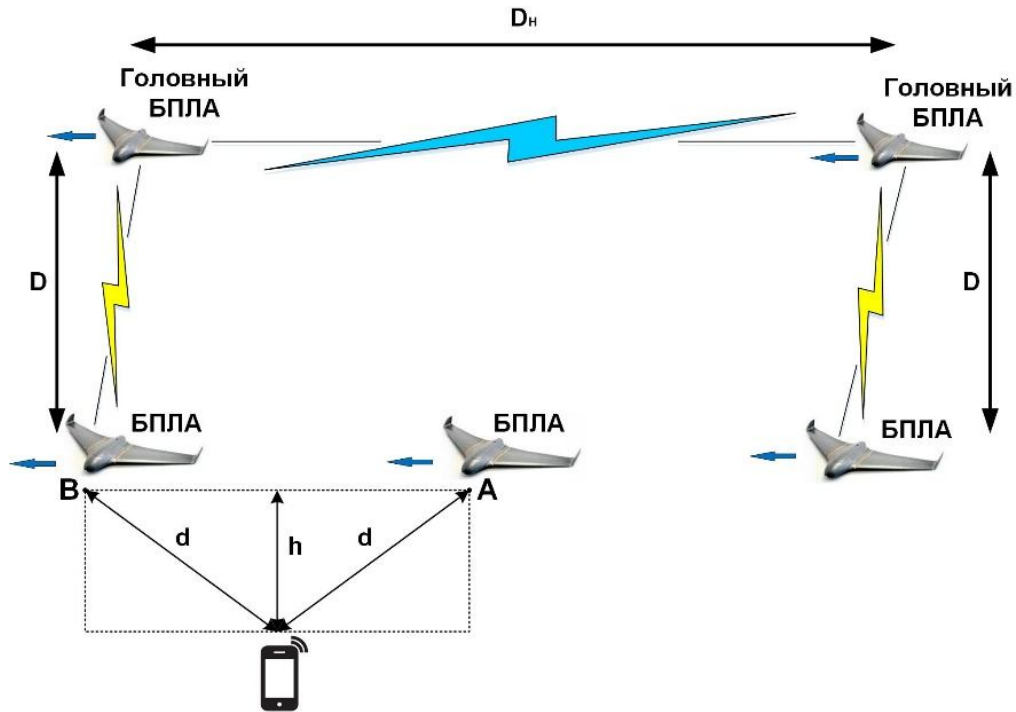


Рисунок 3.26 – Схематическое представление расстояния между всеми элементами

Теперь рассчитаем расстояние между членами БПЛА в одной группе, оно равно $2 \cdot h = 56,56 м$, это расстояние считается допустимым, потому что радиус действия членов БПЛА ($D = 100 м$). Ввиду того, что расстояние между головными БПЛА ($D_H = 500 м$), то мы можем рассчитать количество членов БПЛА в одной группе для обеспечения непрерывной связи по формуле (3.13):

$$N = \max \left[\frac{D_H}{2 \cdot h} \right] + 1 = 10 \quad (3.13)$$

На рисунке 3.27 видно, что максимальное количество членов БПЛА в группе вдоль прямой линии составляет 10 (5 слева и 5 справа), а максимальным количеством хопов при передаче голоса от абонента до головного БПЛА является

5. В свою очередь, голосовой трафик можно передать через несколько БПЛА до головного БПЛА в ячеечном режиме, которая поддерживается для стандарта IEEE 802.11p.

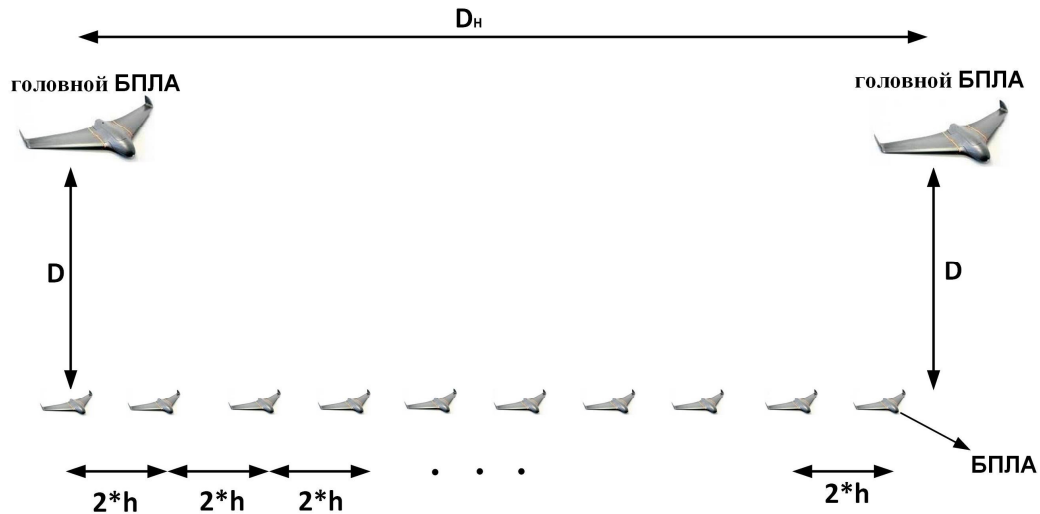


Рисунок 3.27 – Взаимодействие БПЛА в группе для обеспечения непрерывной связи для абонентов

Поскольку расстояние между БПЛА равно 56,56 м, а радиус передачи данных у БПЛА составляет 100 м, то возможно возникновение зон перекрытия как показано на рисунке 3.29. Для расчета площади покрытия групп БПЛА, необходимо рассчитать площадь покрытия как минимум между двумя БПЛА.

Площадью покрытия одного БПЛА (см. рисунок 3.28), которую рассчитаем по формулу (3.14), является круг с радиусом $R_{cov} = 28,28(м)$ ($R_{cov} = IH = r^2 - h^2$).

$$S_{cov1} = \pi \cdot R_{cov}^2 \approx 28884(м^2) \quad (3.14)$$

На рисунке 3.27, площадь покрытия между двумя БПЛА равна общей площади покрытия двух БПЛА за вычетом перекрытия двух площадей и составляет:

$$S_{cov2} = S_{cov1} + S_r \approx 28884 + 10687 \approx 39571(м^2), \quad (3.15)$$

где S_r — избыточная площадь.

$$S_r = \pi \cdot R_{\text{cov}}^2 - \left(\left(2 \cdot \pi \cdot R_{\text{cov}}^2 \cdot \frac{2 \cdot \arccos\left(\frac{h}{R_{\text{cov}}}\right)}{360} \right) - \left(\frac{1}{2} \cdot \left(2 \cdot h \cdot 2 \cdot \sqrt{R_{\text{cov}}^2 - h^2} \right) \right) \right) \quad (3.16)$$

Поскольку расстояние между БПЛА в одной группе одинаковое, то избыточная площадь — *redundant area* (S_r) также одинаковая, отсюда получается площадь покрытия одной группы БПЛА, состоящая $n=10$ БПЛА, равная:

$$S_{\text{cov}10} = S_{\text{cov}1} + (n-1) \cdot S_r \approx 28884 + 9 \cdot 10687 \approx 125067(\text{м}^2) \quad (3.17)$$

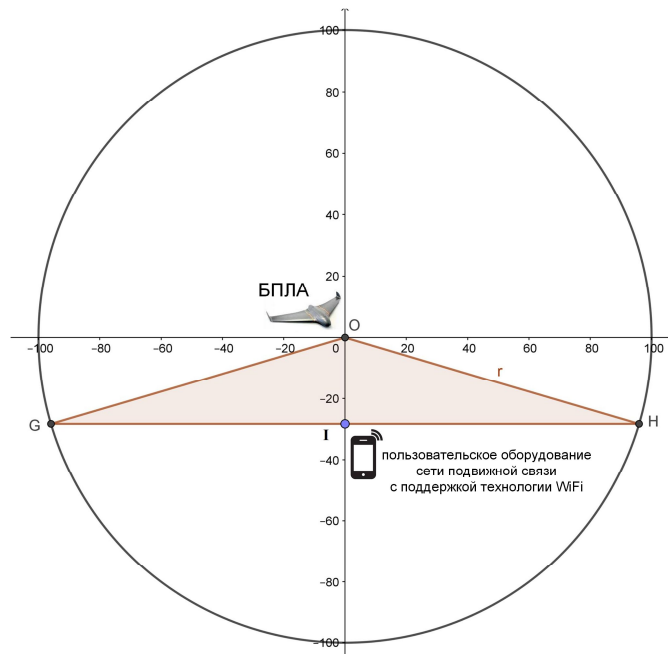


Рисунок 3.28 – Зона покрытия одного БПЛА

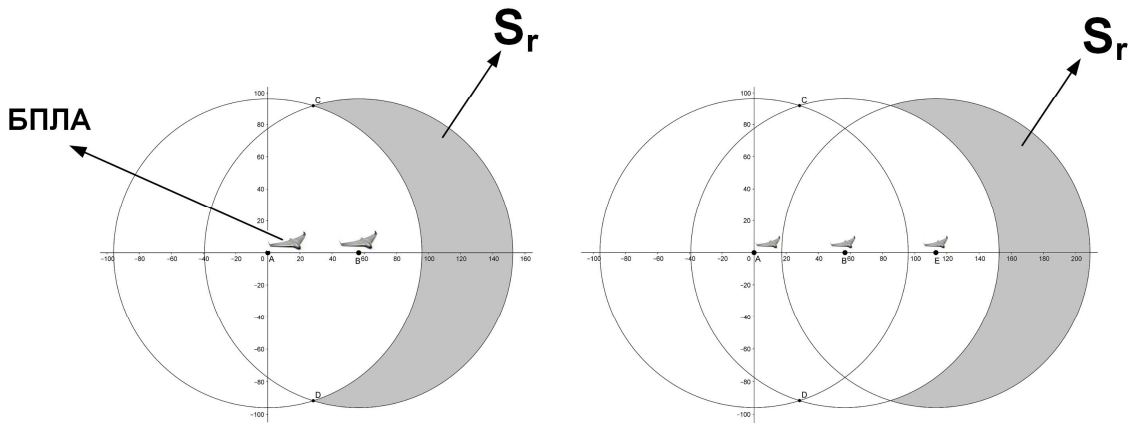


Рисунок 3.29 – Схематическое изображение зоны покрытия между двумя БПЛА, с учетом перекрытия двух зон

3.4.3 Метод обеспечения непрерывного соединения для обеспечения гарантированной связи

В сетях Wi-Fi каждая станция (STA) – пользовательское оборудование сети подвижной связи — связана с точкой доступа (AP) – которая расположена на борту БПЛА и обеспечивает доступ к базовой станции. При движении БПЛА точки доступа перемещаются по зонам соответственно, поэтому пользовательское оборудование сетей подвижной связи осуществляют переподключение к доступной точке доступа, но при этом передача голосового трафика не прекращается. Этот процесс называется хэндовером. Для обеспечения бесшовной связи необходимо ускорить процесс хэндовера. Процесс хэндовера состоит из четырех основных этапов:

- 1) обнаружение возможного набора точек доступа на которые могут переданы данные;
- 2) выбора AP назначения;
- 3) связь с этой AP,
- 4) (повторная) аутентификация мобильной станции STA в сети.

Аутентификация пользовательского оборудования сетей подвижной связи является важным требованием безопасности в сетях Wi-Fi. В частности, из-за отсутствия физического соединения между STA и AP аутентификация становится незаменимой для контроля доступа к сети. Однако механизмы аутентификации, используемые в Wi-Fi, функционируют достаточно медленно и не могут гарантировать низкую задержку для обеспечения хэндовера. В процессе хэндовера вовлечено три основные участники:

- мобильная станция (STA) — пользовательское оборудование сети подвижной связи;
- точка доступа (AP) расположенная на борту БПЛА;
- сервер аутентификации, авторизации и учета (AAA).

На рисунке 3.30 показывается время задержки на каждом шаге хэндовера.

T_{scan} — время задержки в фазе сканирования,

T_{auth} — открытая аутентификация,

T_{asso} — ассоциация,

T_{lx} — IEEE 802.1X [122],

T_{4way} — четырехстороннее рукопожатие.

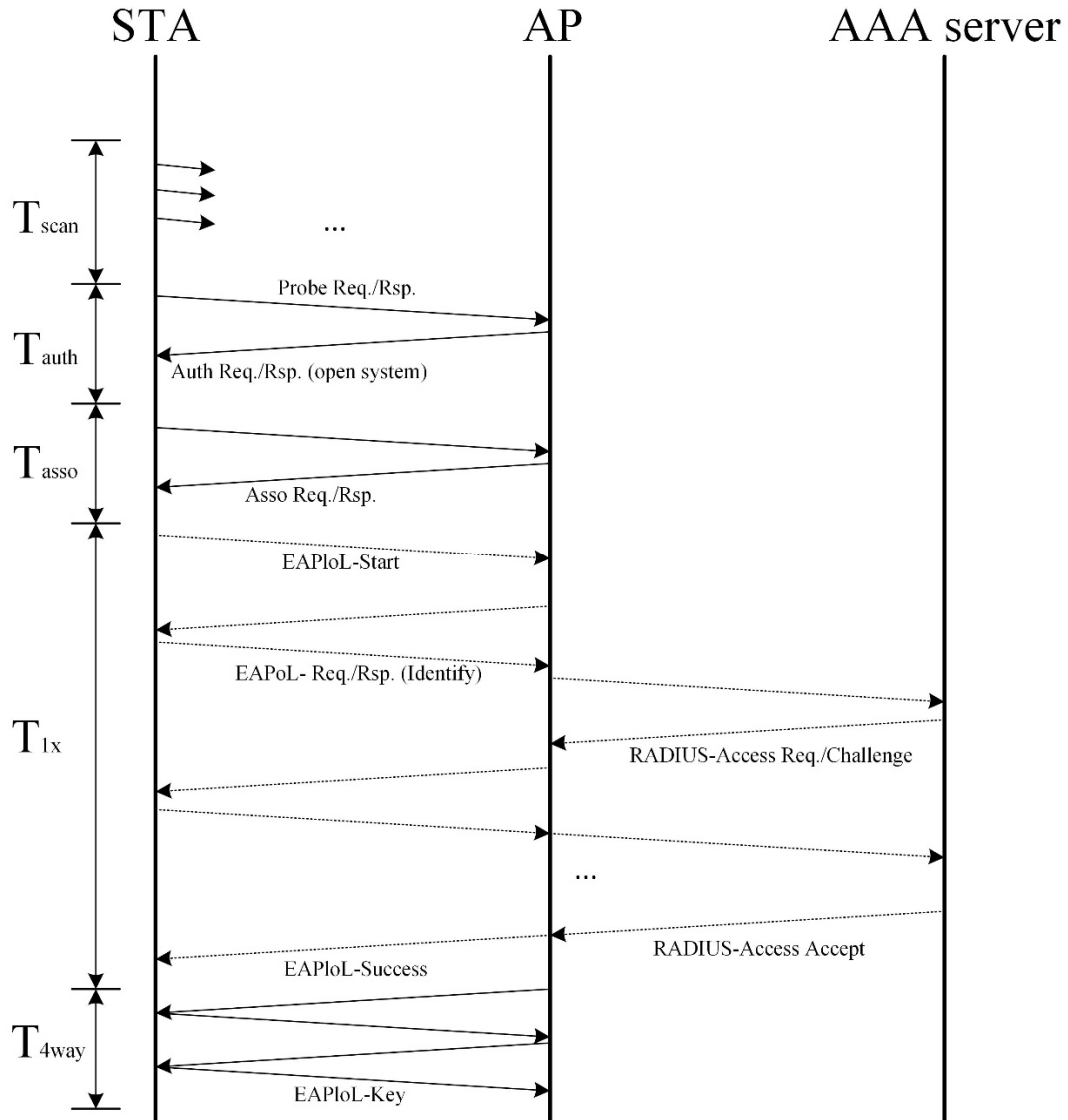


Рисунок 3.30 – Взаимодействие элементов для поддержки процесса передачи

Типичные коммуникационные сообщения протокола, участвующие в процессе, представлены стрелками между вертикальными линиями.

Первой фазой процесса хэндовера является определение, необходимо ли изменить AP и если да, то с какой AP следует связать STA. Эта фаза может длиться несколько секунд, но это можно сделать без фактического разрыва соединения. Следующий этап процесса хэндовера содержит пустой шаг аутентификации,

который является наследием WEP (Wired Equivalent Privacy), архитектуры безопасности, которая занимает очень короткое время. Следующим этапом является фаза ассоциации, в которой STA устанавливает логическое соединение с AP. Цель этого шага — уведомлять всю сеть о том, что STA теперь может быть подключена к любой другой AP. Время, необходимое для ассоциации, незначительно, поэтому нет необходимости тратить какие-либо средства на ускорение этой фазы.

Действительная фаза аутентификации начинается после фазы ассоциации. На этом этапе, STA аутентифицируется в сервер AAA, который помогает настроить общий сеанс между STA и AP. Как мы увидим позже, эта фаза может занять значительное количество времени, особенно если сервер AAA удаленный.

Наконец, STA и AP выполняют четырехстороннее рукопожатие, в результате чего они согласуют знание ключа сеанса друг с другом, и они также получают новые ключи от общего ключа сеанса для различных целей. Четырехстороннее рукопожатие является необходимым для того, чтобы соответствовать стандарту IEEE 802.11i. Он не может быть сокращен, но к тому же он не занимает слишком много времени, поскольку используется только в пределах локальной сети.

В работах [123, 124] доказано, что фаза аутентификации занимает много времени, и поэтому хорошей идеей является ускорение этой фазы. Для достижения этой цели, в работе [124], авторы предполагали модификация протокола EAP-SIM, который описывается в RFC 4186 [125]. Механизм аутентификации протокола EAP-SIM основан на схеме, используемой в сетях GSM для аутентификации абонентов. В случае сети Wi-Fi, STA и сервер AAA делят общий ключ K_i . Когда STA перемещается из одной базовой станции к другой базовой станции, она должна повторить идентифицировать себя в сети. Сервер AAA отправляет так называемые триплеты на базовую станцию, где каждый триплет содержит случайное значение RAND, ответ SRES и ключ сеанса K_c . Базовая станция бросает вызов STA с RAND, с помощью специальных вычисленных алгоритмов, STA сможет сам считать SRES и отправит ответ к базовой станции. Если ответ у STA совпадает с SRES, который

сервер AAA отправил на базовую станцию раньше, то STA принимается. Ключ сеанса K_c поддержит безопасность связи между STA и базовой станцией.

Основной идеей модификации протокола EAP-SIM является рассмотрение случая, когда пользовательское оборудование сети подвижной связи, которое уже подключено к сети, подключается к другой точке доступа, в таком случае триплеты, необходимые для его аутентификации, уже будут доступны в новой точке доступа, и нет необходимости в удаленной связи. В случае, когда происходит процесс хэндовера, такие триплеты уже должны быть доступны, поскольку они предварительно загружаются во время предварительной авторизации, когда STA еще связана со старой точкой доступа. Если триплеты находятся в базе данных, аутентификация может выполняться локально. Это значит, что STA не надо связаться с сервером AAA во время процесса хэндовера. На конец, авторы нашли способ уменьшения задержки аутентификации ниже 55 мс.

Если рассмотреть применение вышеописанного метода к нашей задаче, то известно, что пользовательское оборудование сети подвижной связи является станциями (STA), а БПЛА первого уровня будет играть роль сервера AAA, БПЛА второго уровня будут играть роль точки доступа (AP). В таком случае, время хэндовера составит менее 55 мс, таким образом, во время звонка между абонентом и службами спасения каждые 13 с время хэндовера будет ниже 55 мс (при скорости движения БПЛА 15 м/с). Так как время хэндовера очень мало, то можно полагать, что оно не сильно влияет на качество звонка.

3.4.4 Представление организации голосовых вызовов в быстроразворачиваемых летающих сетях в виде системы массового обслуживания

Выше была рассмотрена иерархическая структура БПЛА как модель летающей сети, которая применяется для предоставления услуги передачи речи. Для того, чтобы оценить работоспособность данной структуры, представим ее как систему обслуживания СМО, в которой каждый БПЛА представляется элементом, который обладает функцией принятия и передачи голосового трафика.

Сначала для использования этой услуги, пользовательское оборудование сети подвижной связи должно пройти процедуру аутентификации с базовой станцией. После этого, пользовательское оборудование сети подвижной связи получит доступа к услуге, и так же узлы БПЛА получают информации об пользовательском оборудовании сети подвижной связи. Звонок между двумя абонентами, например, между пострадавшими и службой спасения, будет выполняться взаимодействием друг с другом через цепочку БПЛА. Модель летающей сети на базе БПЛА удовлетворяется условием приемлемого качества восприятия для передачи голоса, если сетевая задержка составляет не более 100 мс между двумя абонентами [109].

Из рисунка 3.31 схематично представлено, что сетевая задержка в этой схеме складывается из времени обработки, время в ожидании очереди, время передачи между абонентским устройством и БПЛА, между БПЛА, и время передачи между БПЛА и базовой станцией. Средняя задержка может быть представлена математически, как в формуле (3.18):

$$\bar{T} = \bar{T}_{s_1} + \bar{T}_{CM} + \bar{T}_{CH} + \bar{T}_{s_2}, \quad (3.18)$$

где \bar{T} — средняя задержка (сумма времени передачи) на всех фазах (мс);

\bar{T}_{s_1} — среднее время доставки в первой фазе (между абонентским устройством и БПЛА) (мс);

\bar{T}_{CM} — среднее время доставки между БПЛА в одной группе (мс);

\bar{T}_{CH} — среднее время доставки между головными БПЛА (мс);

\bar{T}_{s_2} — среднее время доставки в последней фазе (между абонентским устройством и базовой станцией) (мс).

Для вычисления задержек в данной системе рассмотрим модель многофазной СМО, представленную на рисунке 3.21. Допускается, что входящие потоки в каждую СМО имеют одинаковые свойства. Следовательно, можно рассчитать среднее время, которое потрачено для доставки одной заявки в каждой СМО

(см. рисунок 3.31). Среднее задержка в многофазной СМО может представлено формулой (3.19):

$$\bar{T} = \sum_1^n \bar{T}_i = \bar{T}_{s_1} + m \cdot \bar{T}_{CM} + (n-1) \cdot \bar{T}_{CH} + \bar{T}_{s_2}, \quad (3.19)$$

где m — максимальное количество проходящих узлов (хопов) в каждой группе БПЛА;

n — количество головных БПЛА.

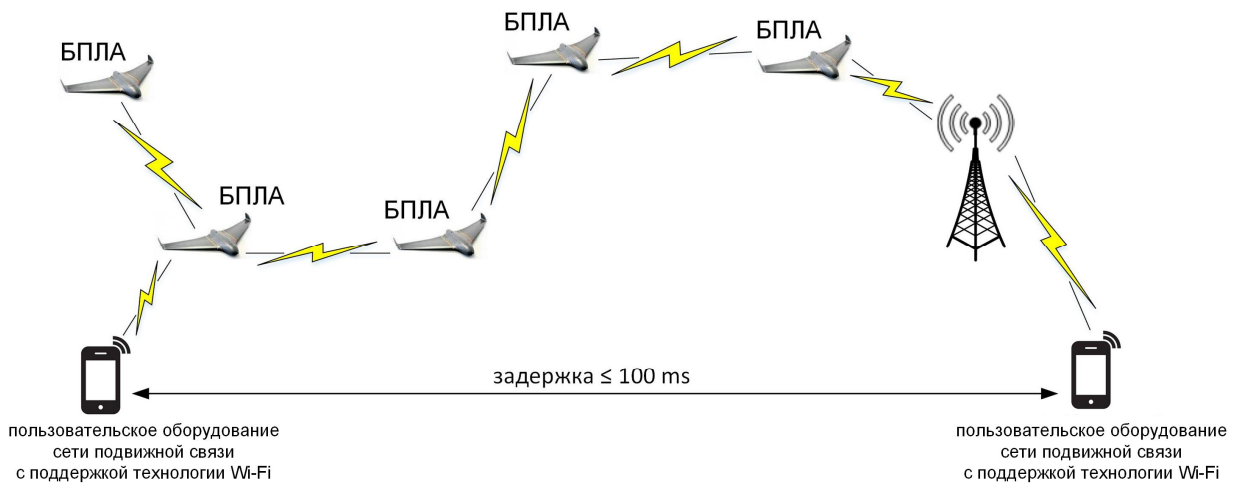


Рисунок 3.31 – Схематическое изображение взаимодействия пользовательского оборудования сети подвижной связи через цепочку БПЛА

Согласно требованию качества передачи голоса, следует что среднее суммарное время \bar{T} не должно превышать 100 мс. По формуле (3.19) и рассмотренной архитектуре летающей сети можно рассчитать количество головных БПЛА, которые требуются для организации сети доставки речи между двумя абонентами. Зная количество узлов БПЛА, мы узнаем возможное максимальное расстояние между базовой станцией и абонентскими устройствами в лесу или площадь покрытия, в которой абонентские устройства должны находиться. Допускается, что время доставки в первой фазе между абонентским устройством и БПЛА \bar{T}_{s_1} и время доставки в последней фазе между абонентским устройством и базовой станцией \bar{T}_{s_2} являются одинаковыми, следовательно, формула (3.19) может сократиться $\bar{T} = 2 \cdot \bar{T}_{s_1} + m \cdot \bar{T}_{CM} + (n-1) \cdot \bar{T}_{CH}$. При этом, у нас получается следующее неравенство (3.20):

$$2 \cdot \overline{T_{s_1}} + m \cdot \overline{T_{CM}} + (n-1) \cdot \overline{T_{CH}} \leq 100$$

$$\Rightarrow n \leq \left(\frac{100 - 2 \cdot \overline{T_{s_1}} + m \cdot \overline{T_{CM}}}{\overline{T_{CH}}} \right) + 1 \quad (3.20)$$

Допускается, что на рисунке 3.21, каждая фаза СМО рассматривается моделью обслуживания М/М/1, в которой голосовой трафик обладает свойствам простейшего потока, и время обслуживания подчиняется экспоненциальному распределению. На каждой фазе или каждой СМО имеется интенсивность загрузки системы, рассчитываемая по формуле (3.8). Потом, среднее время доставки в каждой СМО может вычислено с помощью формулы (3.9).

Как было отмечено выше, что в настоящее время абонентские устройства поддерживают технологии Wi-Fi IEEE 802.11n/ac, которые предоставляют достаточно высокие скорости передачи данных. Согласно стандарту IEEE 802.11n скорость передачи данных составляет $b_n=300\text{Мбит/с}$, а технология IEEE 802.11ac $b_{ac}=650\text{Мбит/с}$. Связь между БПЛА осуществляется согласно стандарта IEEE 802.11р в двух режимах. В каждой группе, БПЛА взаимодействуют друг с другом, а также с головным БПЛА по технологии IEEE 802.11р в обычном режиме со скоростью передачи $b_p=12\text{Мбит/с}$. В то время как головные БПЛА взаимодействуют друг с другом на базе стандарта IEEE 802.11р в расширенном режиме со скоростью передачи $b_{p^*}=6\text{Мбит/с}$. В расширенном режиме, расстояние передачи данных может достигнуть 740м, поэтому для обеспечения гарантированной скорости передачи выберем значение 6 Мбит/с. А в обычном режиме для стандарта IEEE 802.11р, расстояние передачи данных составляет около 100м и скорость передачи может достигать 12 Мбит/с [126, 127].

Следовательно, можно вычислить среднюю продолжительность обслуживающих заявок по формуле (3.11). Как выше была рассмотрена иерархическая структура организации БПЛА, на базе введенных допущений удалось узнать количество узлов (хопов) в каждой группе БПЛА, т.е. $m = 5$, чтобы удовлетворять условиям полного покрытия и обеспечения связи. Поэтому с использованием формул (3.9, 3.11, 3.19) мы можем вычислять среднее время

доставки при изменении количеств головных узлов n соответственно с различным количеством группы БПЛА. Если предположить, что коэффициент загрузки каждой фазы СМО $\rho_i = 0,5$, то результаты вычисления времени доставки представлены на рисунке 3.32.

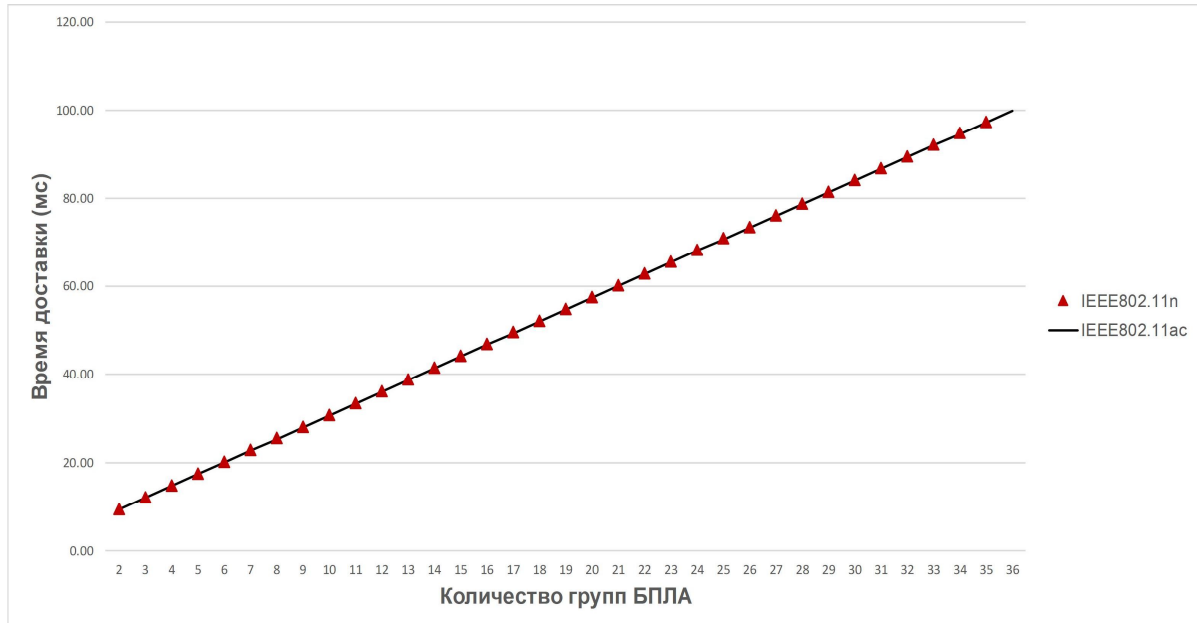


Рисунок 3.32 – Зависимость между временем доставки голосового трафика и количеством БПЛА для иерархической структуры

На рисунке 3.32 представлен расчет времени доставки голоса между абонентами при изменении количества групп БПЛА для модели М/М/1 при загрузке всей системы 0.5. Согласно результатам, установлено необходимое количество групп БПЛА, для покрытия области и обеспечения связи в лесу. При условии времени доставки голосового трафика более 100 мс по рисунку 3.32 мы получали максимальное количество групп БПЛА, равное 35 при использовании технологии IEEE 802.11n и равное 36, при использовании технологии IEEE 802.11ac. Видно, что разница незначительная, потому что основное время задержки при передаче голоса — это время передачи через систему БПЛА, в которой используется технология IEEE 802.11p. Мы знаем, что тем больше групп БПЛА чем большую область возможно покрыть. Поэтому результаты, которые представлены на рисунке 3.32, также показывают максимальное покрытие области при выполнении условия время доставки голоса не больше 100 мс. В реальной

ситуации существует зависимость от расстояния между целевыми зонами и базовой станцией, в таком случае мы можем определить количество необходимых групп БПЛА для развёртывания, но не больше 35.

Далее модель с использованием БПЛА рассматривается при изменении коэффициента загрузки каждой фазы СМО. Следовательно, получается среднее время доставки и, соответственно количество групп БПЛА в зависимости от интенсивности загрузки. По формулам (3.6 - 3.19), результат вычисления количества групп БПЛА представлен на рисунке 3.33.

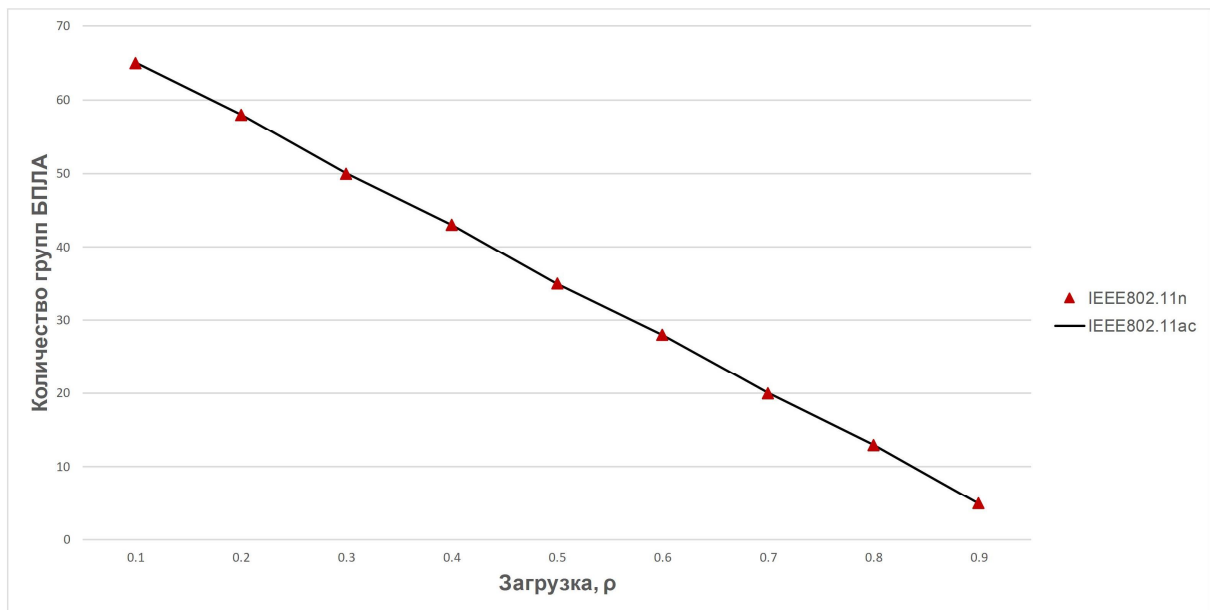


Рисунок 3.33 – Зависимость между количеством БПЛА и загрузкой системы для иерархической структуры

Из рисунка 3.33 видно, что при увеличении загрузки системы то количество групп БПЛА уменьшается для поддержания времени доставки голосового трафика между двумя абонентами не более 100 мс. Как выше сказано, что основное время задержки при доставке голосового трафика — это время доставки через системы БПЛА поэтому получается количество групп БПЛА почти равно для двух технологии передачи IEEE 802.11n/ac. При загрузке системы на 0.1 максимальное количество БПЛА равно 65, а при загрузке системы на 0.9 максимальное количество БПЛА равно 5.

Выводы по главе 3

В главе 3 были рассмотрены новые подходы по передачи данных в приложениях ДР на базе самоорганизующейся сети. Предлагаемый подход является одним из сценариев, который используется в сетях связи пятого поколения 5G/IMT-2020 и может быть рассмотрен для внедрения в существующих решениях в Умных городах. Область применения сетей IEEE 802.15.4 для передачи мультимедийной информации является специфической, ввиду того что данный тип сетей предназначался для передачи данных о состоянии сенсорных узлов, распределенных на большой территории. Главным преимуществом использования таких сетей является низкая стоимость, высокая автономность, простота и надежность эксплуатации этих сетей, что позволяет рассматривать эти сети для передачи мультимедийных данных в будущем для приложений ДР, в том числе для спасателей, которые ликвидируют последствия стихийных бедствий.

Предложены методы предоставления услуг ДР на основе Mesh-сети и оценены показатели качества обслуживания для услуг ДР.

Рассмотрена возможность использования технологии BLE5.0 для предоставления услуг ДР, при условии, что обеспечивается беспроводной канал для обмена данными между оконечными устройствами (end-to-end device) и сервером ДР. При этом, рассматриваются характеристики ячеистой сети на базе технологии BLE и модель системы обслуживания приложения ДР в данной сети. Проведено имитационное моделирование в пакете AnyLogic. Полученные результаты показывают сетевую задержку при передаче данных, которые зависят от количества узлов в сети BLE5.0, через которую происходит обмен между ДР-Клиентом и сервером, а также от коэффициента загрузки.

Представлен подход использования БПЛА для передачи голосового трафика между поисково-спасательными службами на местах с использованием технологии Wi-Fi. Предложена архитектура сетевого взаимодействия для подключения мобильных абонентов, которая организована на основе летающей сети. В данной архитектуре технология IEEE 802.11p используется для связи с БПЛА, а технология IEEE 802.11n/ac — для связи между БПЛА и пользовательского оборудования сети

подвижной связи. Также было рассмотрено влияние передачи данных на качество обслуживания вызовов, так как БПЛА в предлагаемой архитектуре фактически становятся мобильной базовой станцией. Получены количественные и качественные значения, которые позволили более эффективно использовать оборудование, а также минимизировать задержки в сети.

Проанализированы модели многофазной системы массового обслуживания типа $M/M/1$ и $G/G/1$, которые рассматривались как для связи с БПЛА, так и для связи между пользовательским оборудованием сети подвижной связи и БПЛА. Проведены расчеты сетевой задержки при передаче голосового трафика в зависимости от количества БПЛА. Результаты показали, что использование двухуровневой архитектуры позволило сократить количество БПЛА, при котором можно гарантировать допустимое качество обслуживания вызовов в зоне бедствия.

ГЛАВА 4: МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ КООРДИНАТ АБОНЕНТОВ В БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ СЕТИ ДЛЯ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ

4.1. Методы обнаружения координат абонентов с использованием сигналов от пользовательского оборудования сети подвижной связи

Каждый год значительное количество людей по всему миру пропал в лесу. Основные социальные причины этих явлений заключаются в неспособности современных людей ориентироваться на местности и переоценке их возможностей, в том числе физических.

Успех поисково-спасательной миссии в лесу сильно зависит от времени, необходимого для поиска пропавшего человека. Для алгоритмизации поисково-спасательных операций была предложена модель POA (Probability of Area) — POD (Probability of Detection), которая является неотъемлемой частью IAMSAR (International Aeronautical and Maritime Search And Rescue manual) [128]. Эта модель позволяет построить оптимальный процесс поиска на основе имеющихся данных о пропавшем человеке, области поиска, физических условиях, отличительных особенностях.

В последнее время, существующие работы по использованию БПЛА в поисково-спасательных миссиях используют технологии обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи для обнаружения пострадавших. Среди беспроводных технологий, используемых для обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи, есть сети подвижной связи 2/3/4G, Wi-Fi и Bluetooth. Технологии обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи могут использоваться совместно с системой компьютерного зрения, которая доказала свою эффективность, если есть прямая видимость между БПЛА и потерянным человеком. В этой сети каждый БПЛА может рассматриваться как мобильный гетерогенный шлюз [103, 106].

Распределение ресурсов для поиска с использованием БПЛА является актуальной темой исследования. Стоимость спасательной операции по-прежнему высока, даже когда используются автоматизированные технологии на основе БПЛА. Таким образом, для повышения эффективности использования ресурсов в сценарии поиска в лесу, мы рассматриваем использование БПЛА как для обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи, так и для обеспечения связи Wi-Fi для наземного сегмента поисково-спасательной команды. Такой подход не требует специальных дополнительных устройств (точки доступа, специального пользовательского оборудования) для связи, который снижает стоимость и улучшает масштабируемость и координацию поисково-спасательных миссий.

4.1.1 Метод по обнаружению координат абонентов с использованием БПЛА

Как было рассмотрено выше, что в экстренных случаях человек может использовать своё пользовательское оборудование сети подвижной связи как генератор сигналов маяков, в этом случае экстренные маяки. Предполагаем, что на пользовательском оборудовании сети подвижной связи пользователя было установлено приложение, которое поможет генерировать экстренные маяки каждую определённую минуту. Из базовой станции МЧС отправляется БПЛА или группа БПЛА, которая облетает по местам и сканирует сигналы маяков, как изображены на рисунке 4.1.

Видно, что количество используемых БПЛА влияет на скорость поиска координат пропавшего человека. В система локализации, установленной на БПЛА, используется программно-комплексный SDR (Software Defined Radio) [129] для сканирования сигналов маяков. Каждая позиция БПЛА, где маяки были обнаружены, сохраняется, чтобы воспользоваться для вычисления координат генерации маяков. Далее, мы рассматриваем методы определения координат, к которым нужно направляться БПЛА.

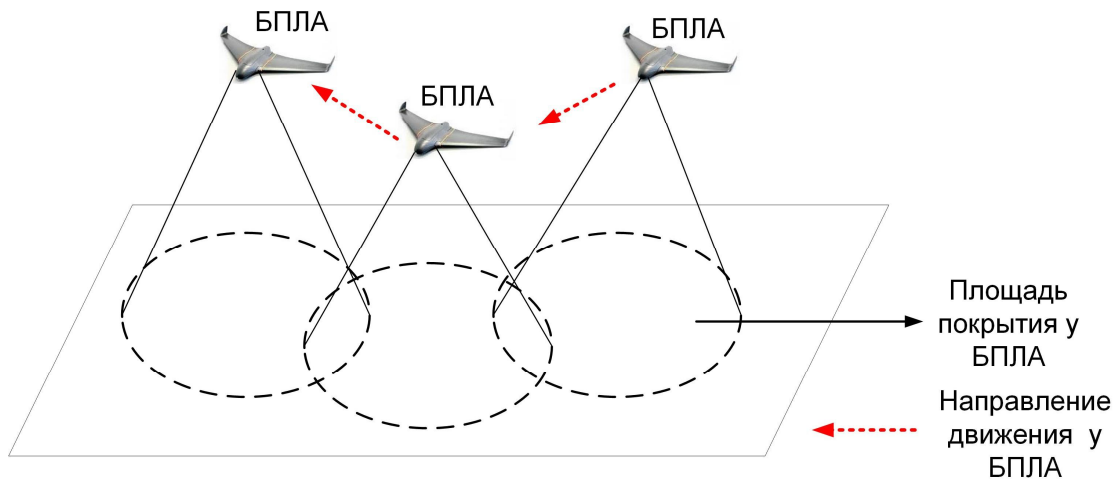


Рисунок 4.1 – БПЛА облетает по определённому маршруту для сканирования маяков

4.1.2 Метод обнаружения с известным расстоянием до источника сигналов радиомаяков

Одним из методов вычисления расстояния является преобразование энергии сигналов между приемником и передатчиком RSSI (Received signal strength indication). Ввиду того, что БПЛА находится в воздухе можно предположить, что будет обеспечиваться прямая видимость между пользовательским оборудованием сети подвижной связи и БПЛА. Таким образом становится возможным вычисление расстояние между портативной базовой станции и источником экстренных сигналов.

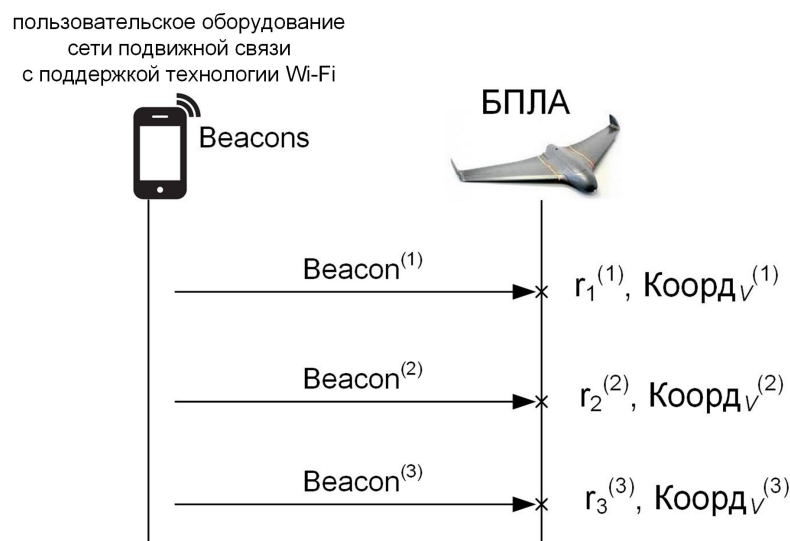


Рисунок 4.2 – Процесс взаимодействия между БПЛА и пользовательским оборудованием сети подвижной связи

На рисунке 4.2 представлено взаимодействие БПЛА с пользовательским оборудованием сети подвижной связи. Координаты БПЛА известны, но для того, чтобы определить координаты пользовательского оборудования сети подвижной связи необходимо получить как минимум три экстренных сигнала. Это похвалит с использованием алгоритмов триангуляции определить координаты пользовательского оборудования сети подвижной связи. Стоит отметить, что зона обнаружения или зона радиопокрытия БПЛА ограничена радиусом r , то в трехмерном пространстве эту зону можно представить шаром с известным центром (координаты БПЛА) и радиусом r . Форма шара представляется уравнением: $(x - x_v)^2 + (y - y_v)^2 + (z - z_v)^2 = r^2$, где (x_v, y_v, z_v) является координатами БПЛА. На рисунке 4.3 представлен метод обнаружения пользовательского оборудования сети подвижной связи, который отправляет экстренные сигналы. Согласно рисунка, искомая точка обнаруживается на расстоянии r , т. е. она находится на шаре с радиусом r с тремя различными позициями БПЛА и тремя расстояниями между БПЛА и пользовательским оборудованием сети подвижной связи.

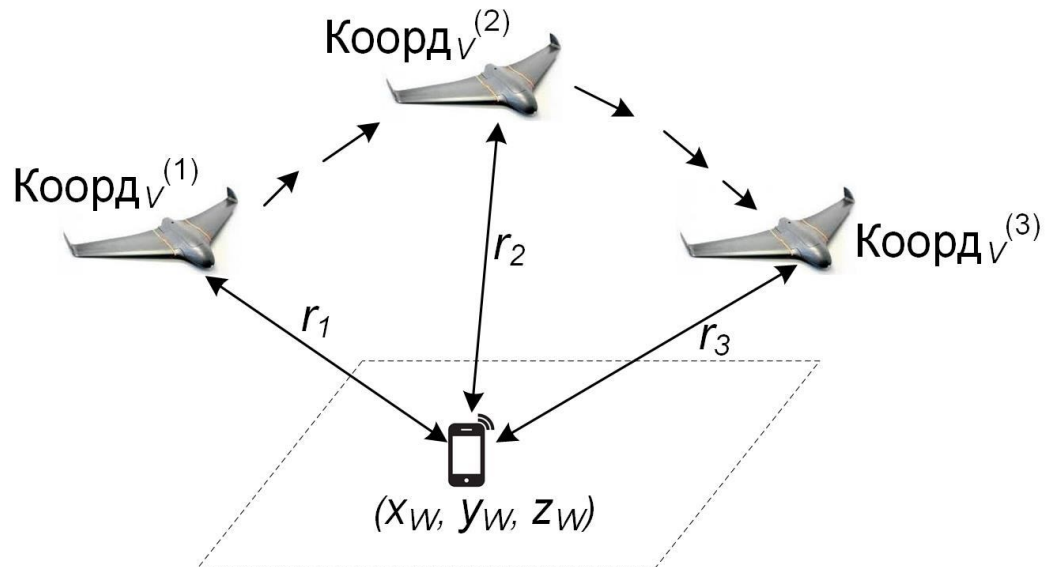


Рисунок 4.3 – метод обнаружения искомой точки

Следовательно, получается система уравнений вида:

$$(x_{v_i} - x_w)^2 + (y_{v_i} - y_w)^2 + (z_{v_i} - z_w)^2 = r_i^2, \quad (4.1)$$

где $i = 1, 2, \dots, K$ — известные координаты K точек;
 r_i — расстояние между i -й позицией и искомой точкой;
 $(x_{V_i}, y_{V_i}, z_{V_i})$ — координаты БПЛА в i -й месте;
 (x_W, y_W, z_W) — координаты искомой точки.

В случае трёхмерного пространства, система (4.1) должна содержать минимум три управления, т. е. $K \geq 3$, тогда система уравнений имеет решение.

Представленная система уравнения также может применить для случая использования групп БПЛА, тогда вероятность успешного определения координат искомой точки увеличивается по сравнению со случаем, где рассматривается только один БПЛА, который осуществляет сканирование радиозёфира на предмет обнаружения экстренных сигналов. Например, при использовании трех БПЛА, которые осуществляют облет местности на одной плоскости и образуют треугольник, как показаны на рисунке 4.4. Кроме этого, вероятность также зависит от скорости полёта БПЛА и частоты отправки экстренных сигналов.

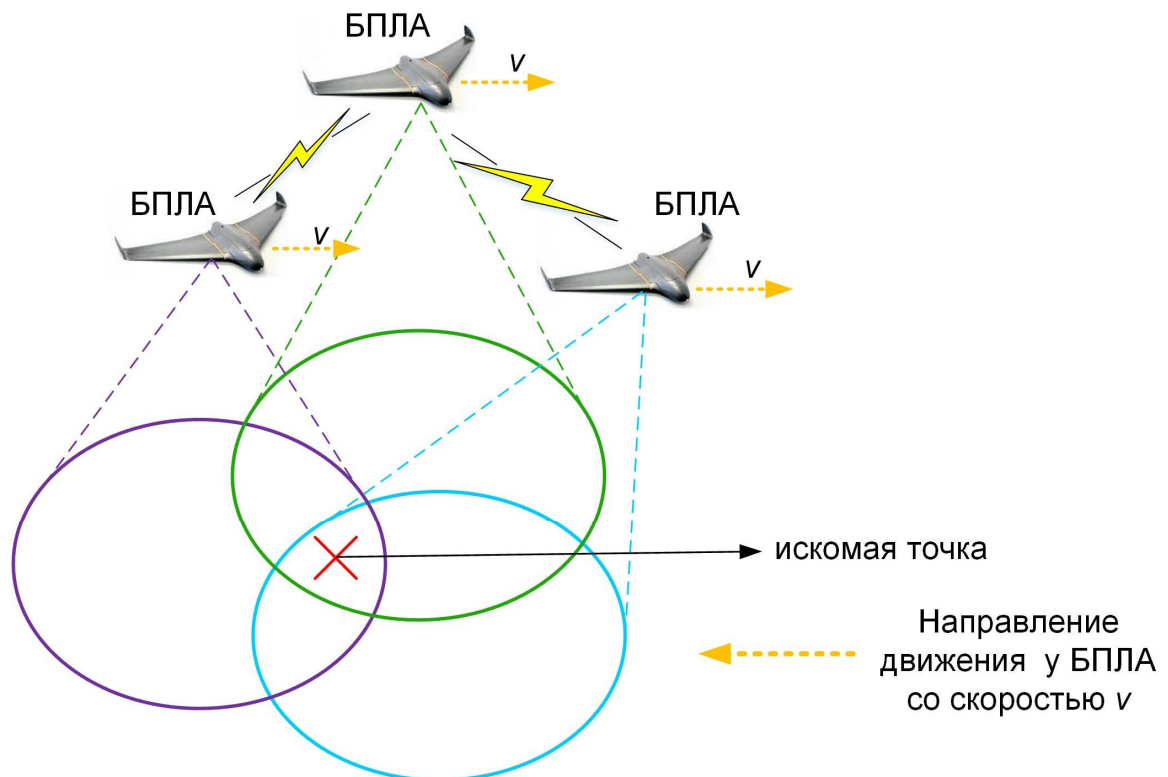


Рисунок 4.4 – Группа БПЛА из трех БПЛА облетает для поиска

4.1.3 Метод обнаружения с неизвестным расстоянием до источника сигналов радиомаяков

В первом случае расстояние между БПЛА и пользовательским оборудованием сети подвижной связи, которое является источником экстренных сигналов, вычислялось на основе RSSI. Точность определения расстояния зависит от отсутствия помех на трассе между источником и приемником, а также от наличия прямой видимости. В некоторых случаях между пользовательским оборудованием сети подвижной связи и БПЛА могут возникать препятствия в виде деревьев, тумана и других мешающих воздействий, поэтому целесообразно рассмотреть метод обнаружения координат пользовательского оборудования сети подвижной связи, когда неизвестно расстояние от БПЛА до источника экстренных сигналов. Каждый БПЛА способен обнаруживать экстренные сигналы в радиусе R_V , следовательно, образуется сфера с центром, являющимся БПЛА, и с радиусом R_V . Эта сфера пересекается с плоскостью земли, поэтому получается круг с центром (x_I, y_I) и с радиусом R на плоскости земли. Очевидно, что если пользовательское оборудование сети подвижной связи (x_W, y_W) находится в зоне круга, то удовлетворяется условие $(x - x_V)^2 + (y - y_V)^2 \leq R^2$ при рассмотрении двумерного пространства на земной плоскости. По рисунку 4.5 представлен случай, когда координаты центра круга (x_I, y_I) могут считаться координатами БПЛА (x_V, y_V) .

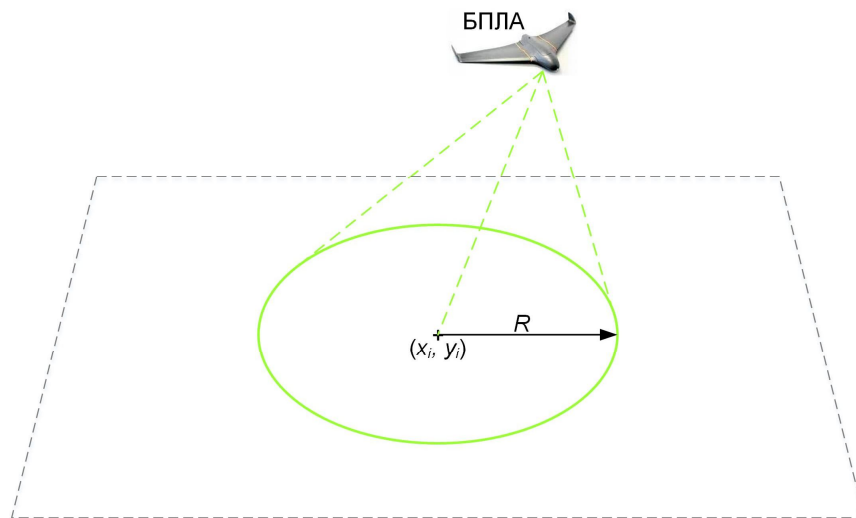


Рисунок 4.5 – Представление координат БПЛА в виде центра окружности с радиусом R .

На рисунке 4.6 представлен случай, когда на земной поверхности были обнаружены 3 позиции экстренных сигналов. Согласно рисунку $Коорд_V^{(1)}$, $Коорд_V^{(2)}$ и $Коорд_V^{(3)}$ соответствуют координатам БПЛА в трех различных позициях.

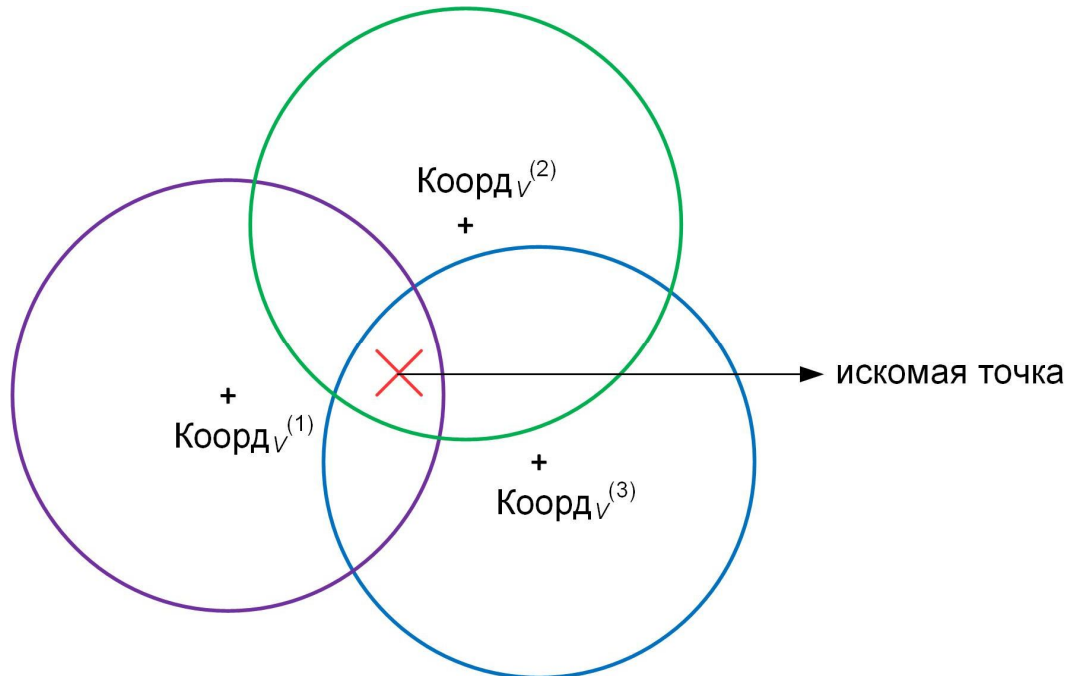


Рисунок 4.6 – Метод определения координат пользовательского оборудования сети подвижной связи на пересечении зон с координатами

Искомая точка — пользовательское оборудование сети подвижной связи — будет находиться в пересечении нескольких кругов, при этом известны координаты центра кругов и радиус R , следовательно, координаты искомой точки задаются выражением (4.2):

$$\left(x_{V_i} - x_w\right)^2 + \left(y_{V_i} - y_w\right)^2 \leq R^2, \quad (4.2)$$

где $i = 1, 2, \dots, K$ — известные координаты K точек у БПЛА;

(x_{V_i}, y_{V_i}) — координаты БПЛА в i -м месте;

(x_w, y_w) — координат искомой точки.

На базе выражения (4.2) можно найти интервал, которому принадлежат координаты пользовательского оборудования сети подвижной связи. При рассмотрении случая с использованием группы БПЛА (i - номер БПЛА в группе) так же воспользуется выражением (4.2) для поиска интервала с координатами

пользовательского оборудования сети подвижной связи. Для вычисления координат пользовательского оборудования сети подвижной связи если хотя бы один БПЛА из группы обнаруживает экстренные сигналы, его позиция сохраняется и отправляется к головному узлу или базовой станции для проведения вычислений координаты искомой точки.

4.1.4 Определение времени поиска

Алгоритм процесса поиска с помощью БПЛА представляется двумя шагами:

- БПЛА облетает и сканирует сигналы *Beacon*.
- Когда БПЛА обнаруживает первый сигнал *Beacon*, чтобы получить достаточно данные сигналов *Beacon*, он начинает облетать по кругу с радиусом R и координатами центра, которые являются позицией обнаружения первого сигнала *Beacon*.

Переходы процесса изображены в диаграмме на рисунке 4.7.

Предлагается, что, скорость БПЛА – $v_{БПЛА}$, частота генерации сигнала *Beacon* – f_B , и дистанция до места обнаружения первого сигнала *Beacon* по направлению полета БПЛА – $S_{БПЛА}$.

Время поиска ($T_{сум}$) равно суммарным временем полета к месту обнаружения первого сигнала *Beacon* (T_1) и полета по кругу в зоне обнаружения (T_2).

Предлагается, искомая точка находится в зоне сканирования с радиусом R . Для того что БПЛА не пропустит сигналы *Beacon*, когда он пролетает на расстояние $2R$, частота генерации сигнала *Beacon* должна удовлетворяться условию формулы (4.3):

$$\frac{1}{f_B} < \frac{2R}{v_{БПЛА}} \Leftrightarrow v_{БПЛА} < 2R \cdot f_B \quad (4.3)$$

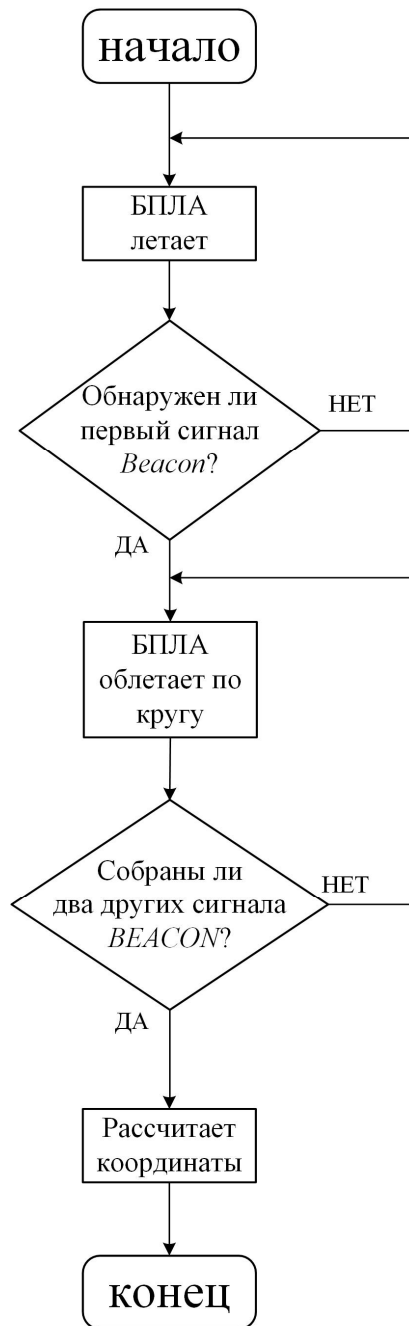


Рисунок 4.7 – Алгоритм процесса поиска с помощью БПЛА

По предлагаемым методам БПЛА требует еще минимум два сигнала Beacon после обнаружения первого сигнала, чтобы можно вычислить координаты искомой точки. БПЛА облетает по кругу с радиусом R , следовательно, расстояние полета является $2\pi R$, k — количество раундов по кругу, тогда у нас получается следующее условие (4.4):

$$\frac{2\pi R}{v_{\text{БПЛА}}} \cdot k > \frac{2}{f_B} \Leftrightarrow k > \frac{2 \cdot v_{\text{БПЛА}}}{2\pi R \cdot f_B} \quad (4.4)$$

Следовательно, суммарное время поиска отображено в формуле (4.5):

$$T_{\text{сум}} = T_1 + T_2 = \frac{S_{\text{БПЛА}}}{v_{\text{БПЛА}}} + \frac{2\pi R}{v_{\text{БПЛА}}} \cdot k \quad (4.5)$$

На пользовательском оборудовании сети подвижной связи установлено приложение, которое генерирует сигналы Weacon с периодом 12 с, тогда скорость БПЛА, которую нужно установить, меньше $2 \cdot R \cdot f_B = 2 \cdot \frac{95,91}{12} = 15,985 \text{ м/с}$, где $R = 95,91(\text{м})$ вычислено в разделе 3.4.2. По неравенству (4.4), у нас получается количество раундов $k > 0,64$. При изменении скорости БПЛА от 10 до 15 м/с, $S_{\text{БПЛА}} = 1000(\text{м})$ по формуле (4.5) время поиска изменяется, как видно по графику на рисунке 4.8.

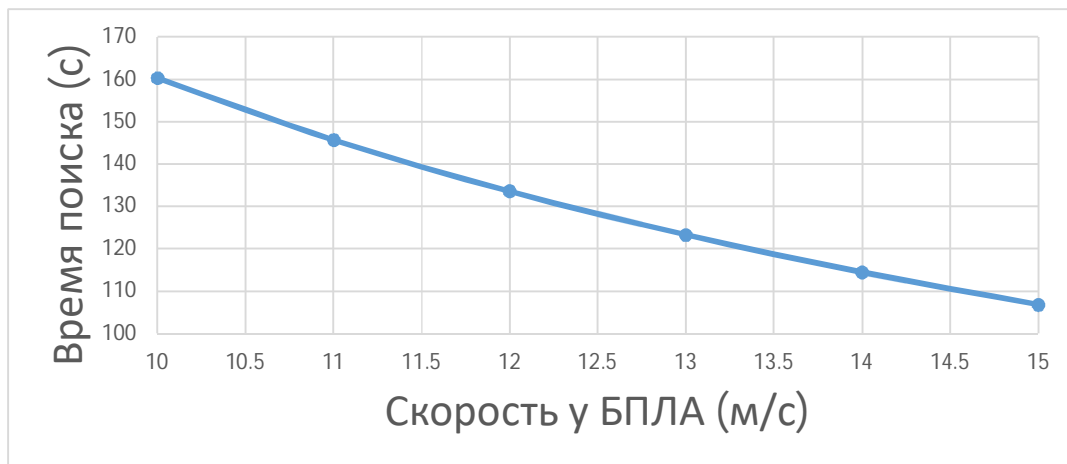


Рисунок 4.8 – Зависимость времени поиска от скорости БПЛА

4.2 Метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры с использованием группы БПЛА

Каждый год значительное количество людей во всем мире погибает в результате несвоевременной помощи от стихийных бедствий: землетрясений, цунами, наводнений, пожаров и др. Кроме того, значительное количество людей пропадают в лесах из-за невозможности своевременно связаться с экстренными службами и сообщить о своем местоположении. Успех поисково-спасательных

операций в значительной мере зависит от времени поиска пропавшего человека, а также возможности точного определения местоположения пострадавшего.

Важной проблемой при стихийных бедствиях является отсутствие телекоммуникационной инфраструктуры, которая либо полностью, либо частично отсутствует. В этой связи, голосовая связь между спасателями или между спасателями и пострадавшими практически невозможна. Эффективность поисково-спасательных операций может быть повышена за счет использования технологий автоматического обнаружения пострадавших с использованием БПЛА. БПЛА включают в себя одну или несколько МБС и группа БПЛА, которые можно рассматривать как мобильные гетерогенные шлюзы [103, 106, 130]. На основе группы БПЛА может быть создана быстроразворачиваемая летающая сеть для экстренных служб [139], которая позволит сократить время, необходимое для обнаружения пострадавших, и уменьшить количество людей, привлекаемых для поисковой операции. Кроме того, в настоящее время в 11-й исследовательской комиссии «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации тестирования и борьба с контрафактными продуктами» сектора стандартизации Международного союза электросвязи разрабатывается рекомендация, которая посвящена протоколам сигнализации и архитектуре быстроразворачиваемых летающих для экстренных служб, в которой группа БПЛА рассматривается как базовая основа для развертывания в районах стихийных бедствий [136].

В такой сети, все БПЛА взаимодействуют как друг с другом, так и со службами спасения одновременно [138, 139]. БПЛА не только мгновенно доставляет агрегированные данные на базовую станцию, но также имеет возможность обмениваться данными друг с другом. Более того, ячеистая топология сети позволяет многократно гарантировать надежность и сходимость сети, ввиду того, что во время полета некоторые БПЛА могут быть отключены из-за низкого заряда батареи, а данные все равно могут быть переданы к базовой станции через другие БПЛА путем ретрансляции.

Кроме того, благодаря группам БПЛА могут быть решены такие проблемы, как малая зона радиопокрытия, сбои в работе сети ввиду отказов узлов-

ретрансляторов и ограниченное управление, которые возникают при использовании одиночных БПЛА [144]. Несмотря на это, при всем многообразии преимуществ групп БПЛА и различных сценариев их применения, существуют также сложности организация связи и сетевого взаимодействия между несколькими БПЛА ввиду их постоянного перемещения в пространстве [145]. Кроме того, необходимо учитывать параметры качества обслуживания (на англ. QoS – quality of services) для нескольких приоритетных услуг в летающей сети. Подуровень управления доступом к среде (на англ. MAC – Medium access control layer) оказывает непосредственное влияние на пропускную способность канала связи, сетевую задержку и должен соответствовать многим строгим требованиям, предъявляемым стандартами IEEE.

В поисково-спасательных операциях группы БПЛА могут использовать различные технологии обнаружения пользовательского оборудования сетей подвижной связи для определения местоположения пострадавших. Среди беспроводных технологий, используемых для обнаружения пользовательского оборудования сетей подвижной связи, можно выделить сети 2/3/4G, Wi-Fi, BLE и др. [26, 27, 146–148]. Технологии обнаружения могут применяться совместно с системой компьютерного зрения, доказавшей свою эффективность при наличии прямой видимости между БПЛА и пострадавшими, а также при отсутствии осадков естественного и искусственного происхождения [17, 18, 20].

В настоящее время, смартфоны, умные часы и фитнес-браслеты стали незаменимыми устройствами для людей. Эти устройства сопровождают людей практически целые сутки, осуществляя сбор данных и их последующую отправку в облачные сервисы. Этот фактор также является важной частью инфраструктуры Умных устойчивых городов, где организовывается бесшовная связь для беспрепятственного доступа мобильных устройств в Интернет. Согласно ключевым индикаторам Умных городов, общедоступная сеть Wi-Fi является неотъемлемой услугой для жителей города [81, 149]. Благодаря этому преимуществу, процесс поиска и спасения людей с помощью обнаружения сигналов Wi-Fi от пользовательского оборудования сети подвижной связи с

поддержкой технологии Wi-Fi пострадавших значительно упрощается. В том случае, когда группы БПЛА, с закрепленными на борту приемопередатчиками, функционирующие в качестве общедоступных точек доступа (Access Point — AP), они рассылают по сети Wi-Fi служебные сигналы они могут быть приняты пользовательским оборудованием сети подвижной связи пострадавшего. В этом случае пользовательское оборудование сети подвижной связи подтвердит получение такого сигнала путём отправки сообщения с подтверждением. Этот метод является основой для определения местонахождения пострадавшего.

4.2.1 Архитектура быстроразворачиваемой летающей сети для обнаружения координат абонентов при стихийных бедствиях

В быстроразворачиваемой летающей сети, ориентированной на поиск пострадавших после стихийного бедствия, группы БПЛА перемещаются с определенным полётным заданием и имеют географическое ограничение. В такой сети, БПЛА взаимодействуют друг с другом, чтобы получать полетное задание от МБС или пересылать собранные данные на МБС [71].

Как упоминалось выше, первая задача поисковой операции — найти местонахождения пострадавших. Архитектура быстроразворачиваемой летающей сети для обнаружения координат абонентов при стихийных бедствиях приведена на рисунке 4.9.

Предполагаем, что пострадавшие всегда имеют с собой пользовательское оборудование сети подвижной связи с поддержкой технологии Wi-Fi, активированное на Wi-Fi прием и -передачу, а также предварительную регистрацию в публичных сетях Wi-Fi, группы БПЛА имеют достаточно энергии для работы в заданной области.

После начала облёта заданной территории, если элемент группы БПЛА получил более двух сигналов Wi-Fi от пользовательского оборудования сети подвижной связи пострадавшего, они начинают вычислять координаты пользовательского оборудования сети подвижной связи. Каждый раз после получения нового сигнала, элемент группы БПЛА повторяет расчет координат пользовательского оборудования сети подвижной связи. Эти сигналы содержат

MAC-адрес пользовательского оборудования сети подвижной связи, который помогает различать различных абонентов на земле.

Затем группы БПЛА отправляют последние расчеты координат пользовательского оборудования сети подвижной связи обратно в МБС, когда они больше не получают сигналы от пользовательского оборудования сети подвижной связи. Группы БПЛА продолжают сканировать заданную территорию, чтобы обнаружить все сигналы с пользовательского оборудования сети подвижной связи пострадавших. Алгоритм процесса поиска на базе групп БПЛА представлена на рисунке 4.10.

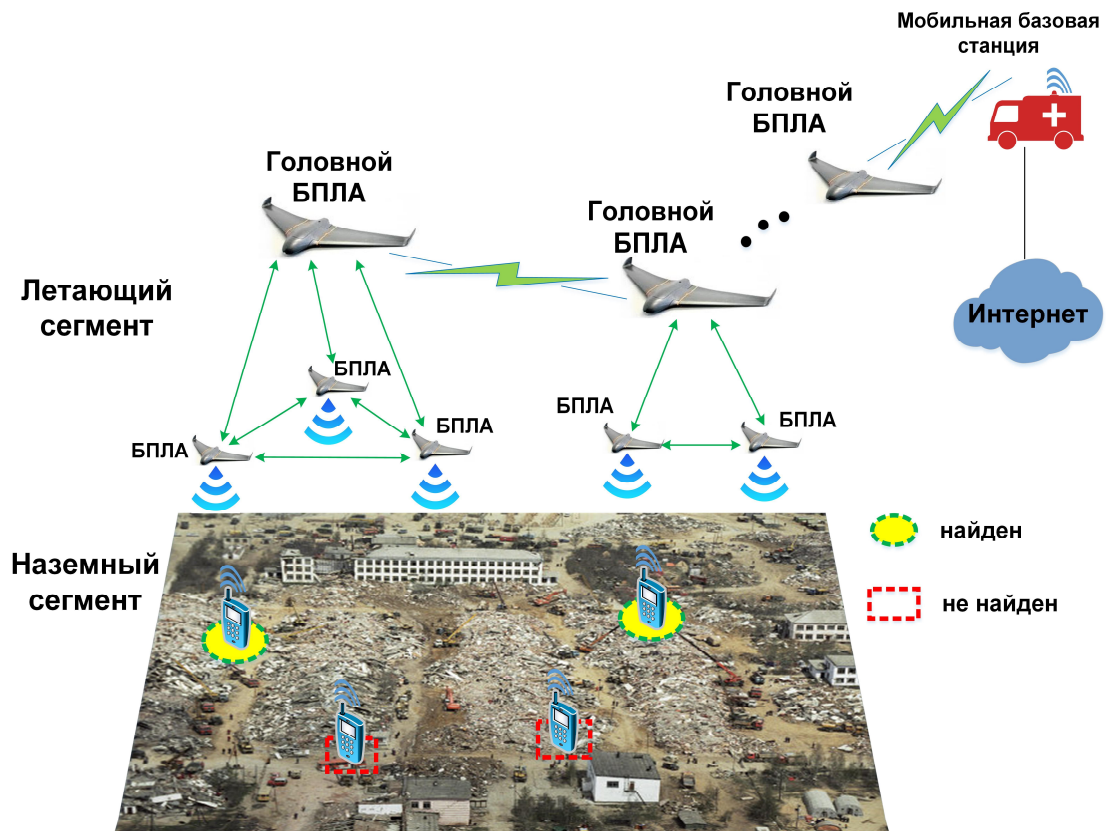


Рисунок 4.9 – Архитектура быстроразворачиваемой летающей сети для обнаружения координат абонентов при стихийных бедствиях

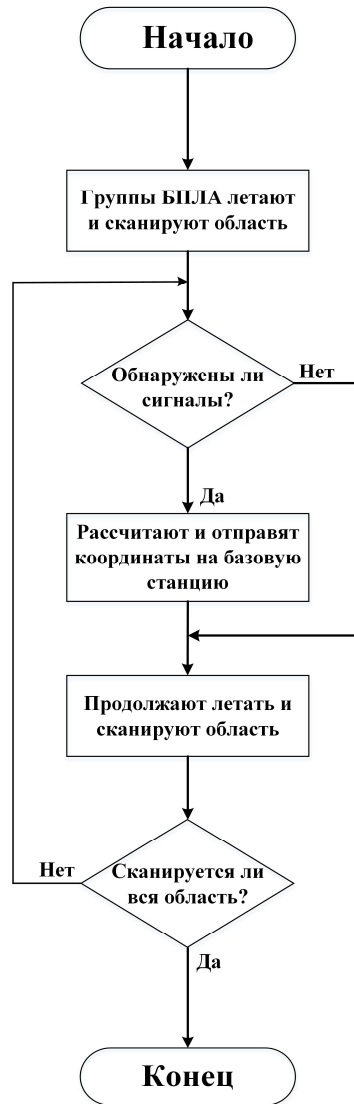


Рисунок 4.10 – Алгоритм процесса поиска на базе группы БПЛА

4.2.2 Метод обнаружения координат абонентов

Во время поиска узлы группы БПЛА непрерывно посылают сигналы радиомаяков об общедоступном Wi-Fi с частотой около 100 мс. Когда пользовательского оборудования сети подвижной связи улавливает эти сигналы и узнает о наличии Wi-Fi, оно начинает взаимодействовать с группой БПЛА. Рисунок 4.11 описывает геометрический подход к определению координат. Предполагая, что пользовательское оборудование сети подвижной связи лежит на земле ($z_0 = 0$), следовательно, необходимо найти координату местоположения пользовательского оборудования сети подвижной связи $(x_0, y_0, 0)$ и i -ю позицию БПЛА при получении

сигнала пользовательского оборудования сети подвижной связи (x_i, y_i, z_i) . Если БПЛА получают m сигналов от пользовательского оборудования сети подвижной связи, координаты точки поиска должны удовлетворять уравнениям (4.5):

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1)^2 = (d_1)^2 \\ \dots \\ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i)^2 = (d_i)^2 \\ \dots \\ (x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + (z_m)^2 = (d_m)^2 \end{cases}, \quad (4.5)$$

где d_i — расстояние между БПЛА и пользовательским оборудованием сети подвижной связи.

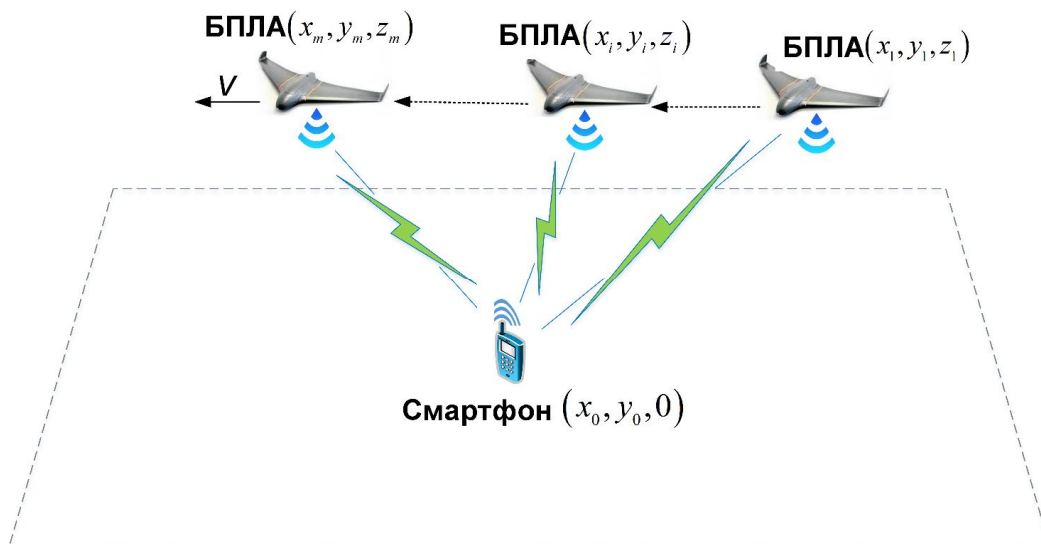


Рисунок 4.11 – Геометрический подход к определению координат

Таблица 4.1 – Время сканирования всех территорий $5\text{км} \times 5\text{км}$ для трех случаев

Типы структур группы БПЛА	горизонтальная линия	треугольник	вертикальная линия
Время сканирования (с)	4400	7224	13056

С практической точки зрения, типовая группа БПЛА может состоять из 3-10 БПЛА [153]. В данной работе, с целью поиска пострадавших, мы предполагаем, что члены кластера БПЛА состоят из трех БПЛА самолетного типа, которые всегда движутся вперед с одинаковой постоянной скоростью $v = 25\text{м/с}$ на высоте $h = 50\text{м}$, а также способны для захвата сигналов с радиусом покрытия $R = 50\text{м}$ с использованием технологии передачи IEEE 802.11n. В процессе поиска существует

три случая структуры группы БПЛА (см. рисунок 4.12): горизонтальная линия (см. рисунок 4.12а), треугольник (см. рисунок 4.12б) и вертикальная линия (см. рисунок 4.12в). Поскольку БПЛА имеют ограничения по скорости и энергии, то сравнивая различные структуры группы БПЛА, можно выбрать наилучшую для поиска пострадавших по времени и точности поиска. Время сканирования заданной территории 5x5 км с помощью группы БПЛА и параметрами, указанными выше, представлено в таблице 4.1. Из таблицы видно, что горизонтальная линия дает самое короткое время сканирования. Но основная цель — найти пострадавших, поэтому главный приоритет — получить как можно больше сигналов, поскольку чем их больше, тем выше точность поиска местоположения пострадавших. Предположим, что пользовательское оборудование сети подвижной связи находится в определенной зоне, и в определенное время полета t (время приема сигналов) через эту зону группа БПЛА всегда может принять, по крайней мере, один сигнал от пользовательского оборудования сети подвижной связи. Для разных структур БПЛА (см. рисунках 4.12а, 4.12б, 4.12в) время t отличается и рассчитывается по формулам:

$$t_{\text{горизонтальная линия}} = \frac{2 \cdot R}{v} \quad (4.6)$$

$$t_{\text{треугольник}} = \frac{2 \cdot R + R \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}}{v} \quad (4.7)$$

$$t_{\text{вертикальная линия}} = \frac{3 \cdot 2 \cdot R}{v} \quad (4.8)$$

Таблица 4.2 – Максимальные числа полученных сигналов

Типы структур группы БПЛА	Время приема сигналов (с)	Максимальное количество принимаемых сигналов
горизонтальная линия	4,00	31
треугольник	6.45	42
вертикальная линия	12,00	53

Во время экспериментов измеряли количество сигналов, посылаемых с пользовательского оборудования сети подвижной связи на группу БПЛА, и время

обработки принимаемых сигналов, которое можно рассчитать с помощью уравнений (4.6), (4.7), (4.8). Результаты в таблице 4.2 показывают, что построение БПЛА в виде вертикальной линии дает возможность получить максимальное количество сигналов, т.е. найти пострадавших с наибольшей вероятностью.

В беспроводной сети на базе моделей распространения радиоволн оценивают потери мощности сигнала при распространении в среде. Так, мощность принимаемого сигнала меньше мощности передаваемого. Для прогнозирования разницы между передаваемыми и принимаемыми сигналами [154, 155] мощность каждого принятого радиосигнала измеряют с помощью показателя уровня принятого сигнала (Received Signal Strength Indicator — RSSI). Расстояние на базе показателя RSSI, как правило, рассчитывается на основе модели логарифмической потери мощности сигнала при распространении в среде:

$$RSSI = A - 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (4.9)$$

где d — расстояние от устройства до передатчика (м);

A — мощность сигнала устройства, измеренная на единичном расстоянии d_0 от устройства (дБм);

n — коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде, показатель связан с конкретной технологии беспроводной связи;

X_σ — Гауссово распределение случайной переменной с нулевым средним значением и дисперсией σ^2 .

В расчете d_0 обычно выбирается равным 1 м. Следовательно, A является показатель RSSI на расстоянии 1 м. Поскольку X_σ имеет нулевое среднее значение, показатель RSSI можно выразить следующим образом:

$$RSSI = A - 10 \cdot n \cdot \log(d) \quad (4.10)$$

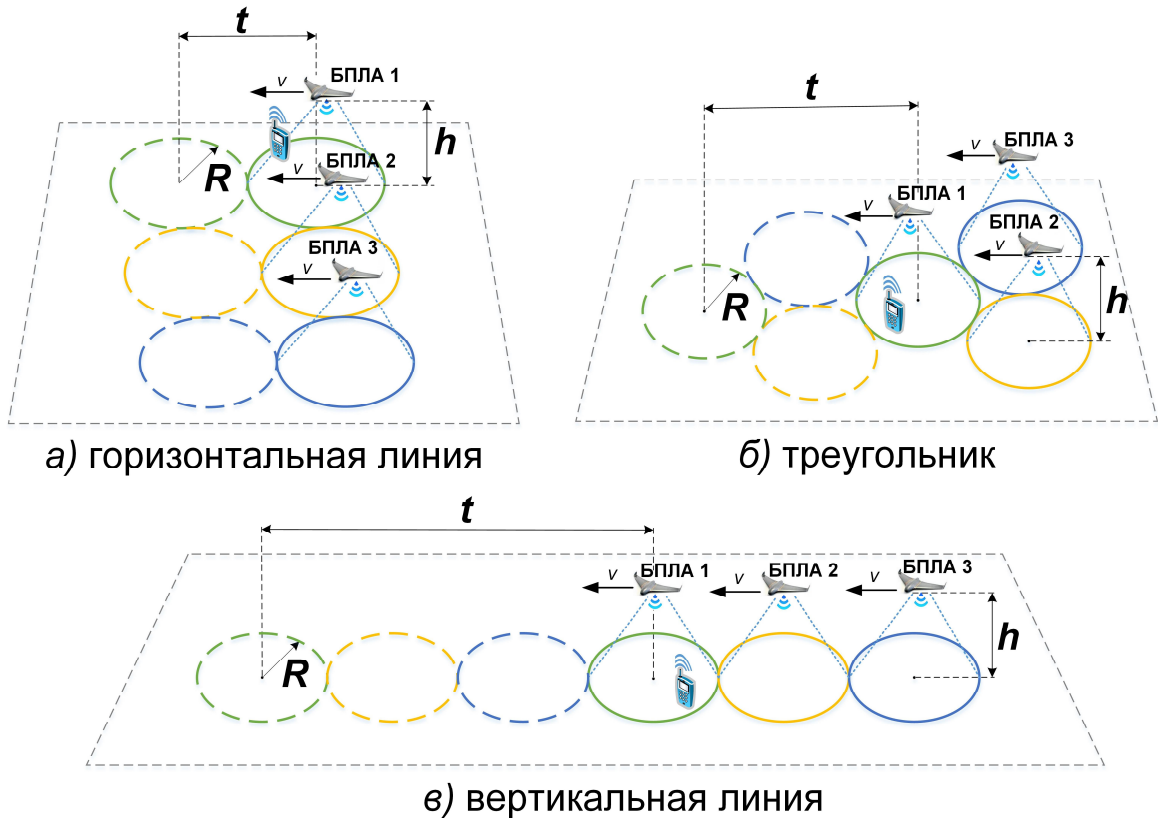


Рисунок 4.12 – Три случайные структуры группы БПЛА для поиска
Согласно уравнению (4.10), расстояние между приемопередатчиками может быть вычислено как:

$$d = 10^{\frac{A-RSSI}{10 \cdot n}} \quad (4.11)$$

В предлагаемой системе элементы группы БПЛА действуют как точки доступа Wi-Fi (Wi-Fi Access Points — AP), которые находятся в режиме ожидания от клиентов. AP может оценивать уровень принимаемого сигнала, генерируемого пользовательским оборудованием сети подвижной связи, когда он подключен к AP. Следовательно, расстояние от AP до пользовательского оборудования сети подвижной связи можно определить по уравнению (4.11).

Поскольку потеря мощности сигнала при распространении в среде зависит от окружающей среды, для повышения точности позиционирования в нашей системе необходимо оценить параметры (A, n) перед развертыванием поисковой операции. Следовательно, в каждой конкретной поисковой операции, группа БПЛА производит предварительную калибровку, т.е. показатель RSSI рассчитывается с

учетом расстояния между БПЛА и начальной точкой, измерение производится несколько раз. Затем для нахождения оптимальных параметров (A, n) используется нелинейный метод наименьших квадратов. При измерениях m эти параметры определяются как:

$$(A, n) = \arg \min_{A, n} \left(\sum_{i=1}^m 10^{\frac{A-RSSI_i}{10n}} - d_i \right)^2 \quad (4.12)$$

Эксперименты проводились для измерения показателя RSSI и расстояния от пользовательского оборудования сети подвижной связи до АР. Полученные значения были использованы для оценки параметров (A, n) в модели расчета расстояния (4.12). Сравнение полученных данных и их усредненное значение показано на рисунке 4.13.

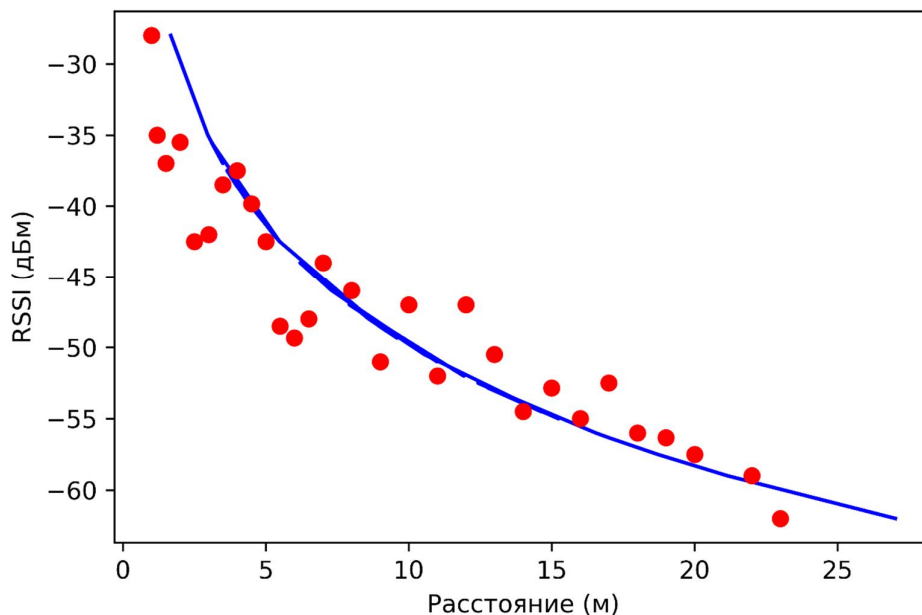


Рисунок 4.13 – Определение расстояния на основе показателя RSSI

После измерения расстояния до источника сигнала БПЛА необходимо вычислить координаты этого источника. Предположим, что на земле позиция пользовательского оборудования сети подвижной связи $p_0(x_0, y_0, 0)$, а БПЛА получает сигнал от пользовательского оборудования сети подвижной связи в

позиции $p_i(x_i, y_i, z_i)$. Расстояние между этими двумя точками рассчитывается с учетом погрешности измерения, которая устанавливается во время эксперимента.

С каждым полученным сигналом с пользовательского оборудования сети подвижной связи, расстояние от него до БПЛА:

$$d(p_i, p_0) = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i)^2} + \xi_{\mu, \sigma} \quad (4.13)$$

Таким образом, количество принимаемых сигналов и погрешность измерения влияют на точность процесса позиционирования. Позиция $p_c(x_c, y_c)$ определяется путем минимизации выражения (4.14):

$$\arg \min_{x_c, y_c} \sum_{i=1}^m \left(\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i)^2} - d(p_i, p_c) \right)^2 \quad (4.14)$$

где m — количество принимаемых сигналов с пользовательского оборудования сети подвижной связи.

В результате минимизации становится возможным вычислить координаты и погрешности.

4.2.3. Анализ полученных результатов

Для оценки возможности определения местоположения на основе сигнала Wi-Fi в модели учитывается количество принимаемых сигналов и ошибки измерения. Согласно рисунку 4.12 и таблице 4.2, группа БПЛА может покрывать определенную зону за t секунд. В этот интервал времени БПЛА могут принимать как минимум один или более сигналов.

Сравнение расстояний между данной точкой и найденной точкой считается ошибкой позиционирования. Разница между ними рассчитывается как:

$$d(p_0, p_c) = \sqrt{(x_0 - x_c)^2 + (y_0 - y_c)^2} \quad (4.15)$$

Моделирование позволяет определить плотность ошибки позиционирования при изменении количества обнаруженных сигналов. На рисунках 4.14 и 4.15 показана плотность вероятности ошибки позиционирования при получении 30 и 3 сигналов соответственно с относительной погрешностью расстояния измерения 20%.

На рисунке 4.16 показана зависимость ошибки позиционирования от количества принимаемых сигналов. Согласно рисунку 4.16, координаты определяются с меньшей ошибкой, когда обнаруживается большее количество сигналов.

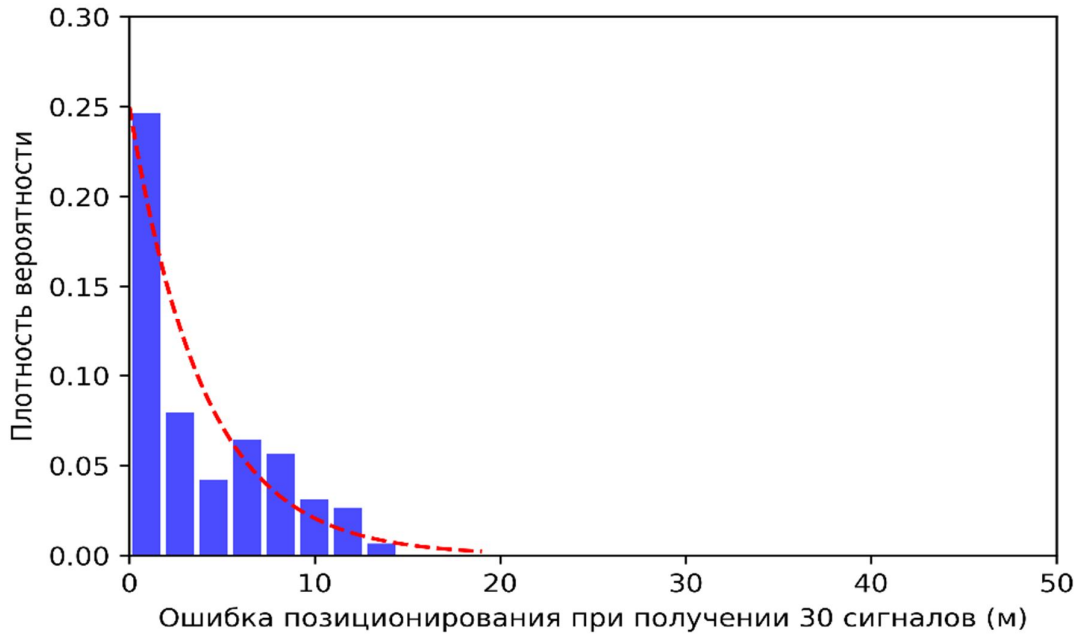


Рисунок 4.14. Плотность вероятности и гистограмма ошибки позиционирования при получении 30 сигналов

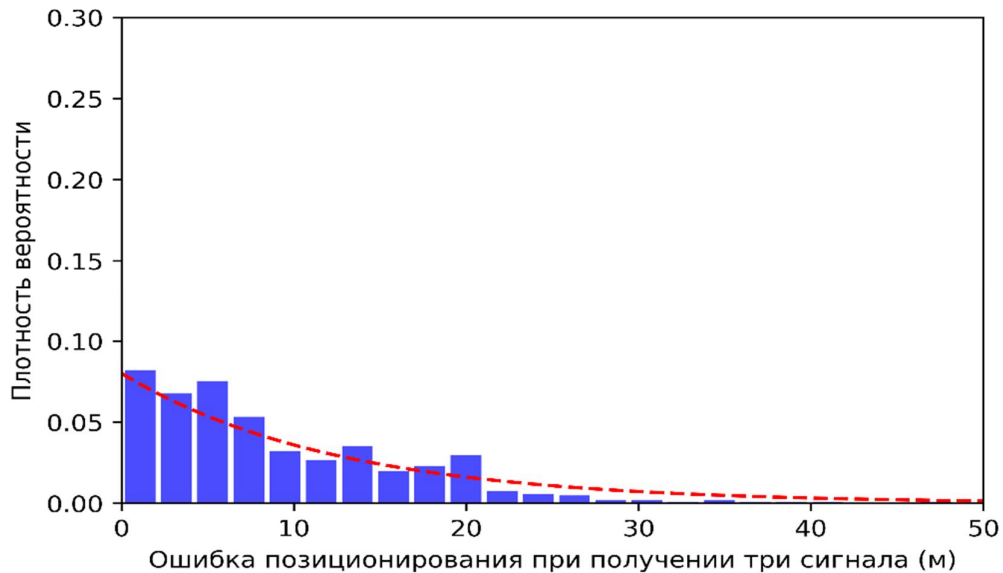


Рисунок 4.15 Плотность вероятности и гистограмма ошибки позиционирования при получении трех сигналов

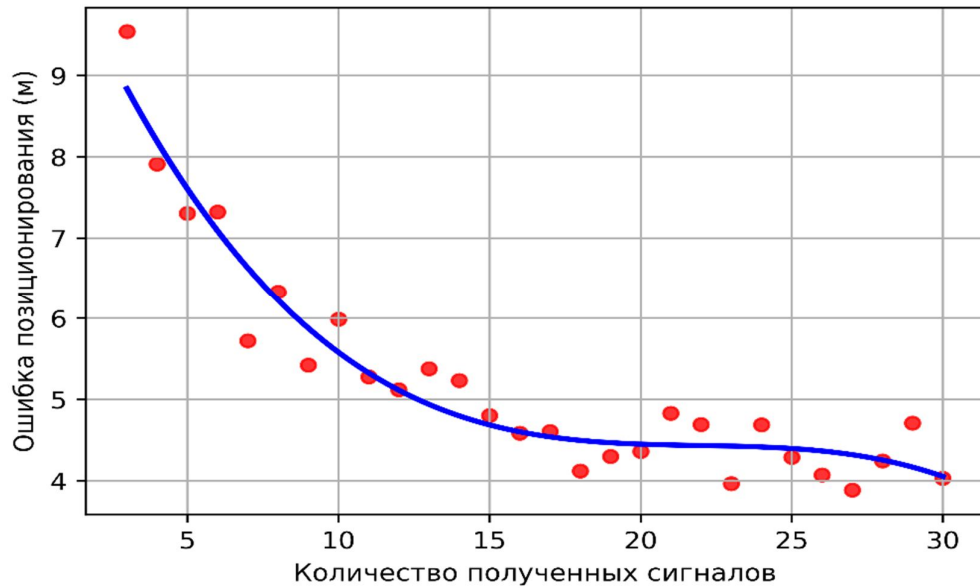


Рисунок 4.16. Зависимость ошибки позиционирования от количества принимаемых сигналов

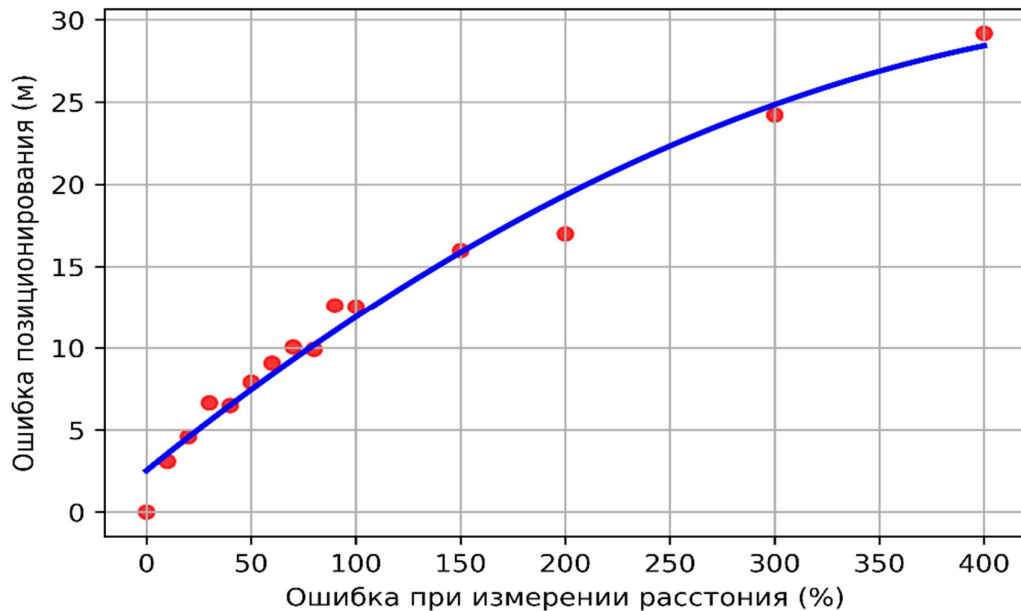


Рисунок 4.17. Зависимость ошибки позиционирования от относительной точности измерения расстояния

С другой стороны, точность измерения расстояния является важным фактором, влияющим на ошибку позиционирования. На рисунке 4.17 показана зависимость ошибки позиционирования от относительной точности измерения расстояния, которая генерируется при моделировании. Количество принимаемых сигналов равно 30.

Результаты моделирования показывают, что ошибка позиционирования увеличивается, когда увеличивается ошибка измерения расстояния. Учитывая полученные зависимости, точность позиционирования может быть достигнута путем повышения качества измерения расстояния и обеспечения обнаружения большего количества сигналов. Измерение расстояния в основном зависит от конкретной технологии и окружающей среды, поэтому в разных случаях могут использоваться различные модели измерения расстояний. Кроме того, способность группы БПЛА принимать сигналы также зависит от количества используемых БПЛА и их скорости.

Выводы по главе 4

Представлены методы поиска людей в лесных массивах с использованием сигналов, которые отправляются от пользовательского оборудования сети подвижной связи пострадавшего. Для поиска предложено использовать БПЛА для двух ситуаций: когда известно расстояние до источника сигналов и когда расстояние неизвестно. Рассмотрена зависимость между скоростью движения БПЛА и временем поиска людей.

Кроме того, была рассмотрена задача обнаружения координат абонентов в условиях разрушенной инфраструктуры с использованием группы БПЛА. В том случае, когда группы БПЛА, с закрепленными на борту приемопередатчиками, функционирующие в качестве общедоступных точек доступа, рассылают по сети Wi-Fi служебные сообщения и могут быть приняты пользовательским оборудованием сети подвижной связи пострадавшего. Результаты экспериментов показывают, что размещение БПЛА по горизонтальной линии дает меньшее время сканирования (в 1,5 раза меньше, чем по треугольнику и в 3 раза меньше, чем по вертикальной линии), в то время, как построение по вертикальной линии позволяет найти пострадавших с наибольшей вероятностью, ввиду того, что возможно получить наибольшее количество сигналов (53 сигнала).

Результаты моделирования показали, что плотность вероятности ошибки позиционирования лучше при наличии большего количества сигналов от

пользовательского оборудования сети подвижной связи (если полученных сигналах 30, то ошибка позиционирования составляет 4 м). Стоит отметить, что ошибка позиционирования увеличивается, с увеличением ошибки измерения расстояния. Как показали результаты исследования, технологии передачи данных, окружающая среда, количество используемых БПЛА и их скорость движения являются наиболее важными факторами, которые в значительной степени влияют на способность группы БПЛА обнаруживать сигналы с пользовательского оборудования сети подвижной связи пострадавших.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Проанализированы принципы организации беспроводных сенсорных сетей, летающих целевых сетей, летающей сенсорной сети и их применения. Показано, что в качестве летающих узлов используются БПЛА или группы БПЛА, которые являются мобильными гетерогенными шлюзами. Такие шлюзы выполняют роль связующих звеньев между устройствами и сетью связи общего пользования, а также являются важными элементами в операциях поиска и спасания.

2. Проанализированы методы построения и функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб. Показано что, после стихийного бедствия инфраструктура сетей операторов связи как правило полностью или частично разрушена. Абоненты не могут связаться как друг с другом, так и с экстренными службами. Для организации радиопокрытия в заданной зоне для сбора данных с устройств Интернета вещей и организации связи целесообразно использовать группу БПЛА. В настоящее время, отсутствуют протоколы сигнализации для взаимодействия между БПЛА в группе. Иерархическая архитектура сети является более предпочтительной для организации наземного сегмента сети для задач сбора данных. Была разработана архитектура, которая поддерживает связь между службами спасения, между спасателями с пострадавшими или между пострадавшими с их родственниками, используя летающую сеть и спутниковые каналы связи.

3. Разработаны методы построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p. Был модифицирован протокол MAC, лежащий в основе протоколов IEEE 802.11p и IEEE 1609.4, который получил название CMMpP. Данный протокол предполагается использовать для организации связи между БПЛА в быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб. Анализ полученных результатов имитационного моделирования позволил продемонстрировать эффективную работу протокола CMMpP и выявить особенности его функционирования.

4. Проанализированы методы передачи мультимедиа-трафика через несколько узлов на базе сетей с ячеистой топологией. Показано, что главным преимуществом использования сетей на базе стандарта IEEE 802.15.4 является низкая стоимость, автономность, простота и надежность эксплуатации, что позволяет рассматривать эти сети для передачи мультимедийных данных для приложений ДР, в том числе для спасателей, которые ликвидируют последствия стихийных бедствий. Предложены методы предоставления услуг ДР на основе ячеистой сети и оценены показатели качества обслуживания для услуг ДР. Рассмотрена возможность использования технологии BLE5.0 для предоставления услуг ДР, при условии, что обеспечивается беспроводной канал для обмена данными между оконечными устройствами и сервером ДР. Полученные результаты позволили определить сетевую задержку при передаче данных. Задержка зависит от количества узлов в сети BLE5.0, через которую происходит обмен данными между ДР-Клиентом и сервером, а также от коэффициента загрузки.

5. Разработан метод передачи голосового трафика через летающую сеть при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи. Представлены две архитектуры быстроразворачиваемой летающей сети для передачи голосового трафика при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи для подключения мобильных абонентов. Технология IEEE 802.11p используется для связи с БПЛА, а технология IEEE 802.11n/ac для связи между БПЛА и пользовательским оборудованием сети подвижной связи. Проанализированы модели многофазных СМО типа M/M/1 и G/G/1, которые рассматривались как для связи между БПЛА, так и для связи между пользовательским оборудованием сети подвижной связи и БПЛА. Использование иерархической архитектуры позволило расширить область покрытия в целевой зоне, при этом гарантируя качество вызова. Установлено необходимое количество БПЛА для покрытия целевой зоны в экстренных случаях, которое может оказать существенную помощь при поиске и спасению пострадавших.

6. Проанализированы методы определения координат абонентов в сети Wi-Fi с использованием БПЛА. Показано, что с использованием БПЛА эффективность поисково-спасательной операций повышается. Обнаружение пострадавших в этих случаях является одной из критических проблем. На основании вышеупомянутых исследований, используя группы БПЛА, рассматривается возможность определять местонахождение и обеспечивать связь для пострадавших в условиях разрушенной инфраструктуры операторов связи или отсутствия зоны радиопокрытия вышек сетей подвижной связи.

7. Разработан метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи с использованием летающей сети на базе группы БПЛА. Представлены методы поиска людей в лесных массивах с использованием сигналов, которые отправляются с пользовательского оборудования сети подвижной связи пострадавшего. Для поиска предложено использовать БПЛА для двух ситуаций: когда известно расстояние до источника сигналов и когда расстояние неизвестно. Рассмотрена зависимость между скоростью движения БПЛА и временем поиска людей. Кроме того, была рассмотрена задача обнаружения координат абонентов в условиях разрушенной инфраструктуры с использованием группы БПЛА. В том случае, когда группы БПЛА, с закрепленными на борту приемопередатчиками, функционирующие в качестве общедоступных точек доступа, рассылают по сети Wi-Fi служебные сообщения и могут быть приняты пользовательским оборудованием сети подвижной связи пострадавшего. Размещение БПЛА вдоль горизонтальной линии дает наименьшее время сканирования, в то время, как построение по вертикальной линии позволяет обнаружить абонентов с наибольшей вероятностью, ввиду того, что возможно получить наибольшее количество сигналов. Результаты численного моделирования показали, что плотность вероятности ошибки позиционирования лучше при наличии большего количества сигналов от пользовательского оборудования сети подвижной связи. Ошибка позиционирования увеличивается, когда увеличивается ошибка измерения расстояния.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Русскоязычные сокращения

БАС	Беспилотная авиационная система;
БЛСЭС	Быстроразворачиваемая летающая сеть для экстренных служб;
БПЛА	Беспилотный летательный аппарат;
БСС	Беспроводная сенсорная сеть;
ВСС	Всепроникающие сенсорные сети;
ДР	Дополненная реальность;
ИВ	Интернет Вещей;
ЛСС	Летающая сенсорная сеть;
МСЭ	Международный союз электросвязи;
МСЭ-Т	Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи;
МЧС	Министерство по Чрезвычайным Ситуациям;
СМО	Система массового обслуживания;
ССОП	Сеть связи общего пользования.

Англоязычные сокращения

3G	Third generation — «третье поколение» — технологии мобильной связи 3 поколения;
5G	Fifth generation — «пятое поколение» — пятое поколение мобильной связи, действующее на основе стандартов телекоммуникаций;
6LoWPAN	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks — стандарт взаимодействия по протоколу IPv6 поверх беспроводных персональных сетей с низким энергопотреблением стандарта IEEE 802.15.4;
AAA	Authentication, authorization, and accounting — аутентификация, авторизация и учет;
AC	Access Category — категория доступа;
AIFS	Arbitration inter-frame spacing — арбитраж расстояния между кадрами;
AIFSN	AIFS-Number — AIFS-номера;

AR	Augmented reality — дополненная реальность;
AP	Access Point — точка доступа
B	Beacon;
BLE	Bluetooth Low Energy — беспроводная технология Bluetooth с низким энергопотреблением;
Bluetooth SIG	Bluetooth Special Interest Group;
CBS	Center base station — центральная базовая станция;
CCH	Control Channel — канал управления;
CCH1	Интервал CCH;
CH	Cluster head — головной узел кластера;
CM	Cluster member — член кластера;
CMMpP	Cluster-based Multichannel MAC IEEE 802.11p protocol — многоканальный протокол MAC IEEE 802.11p на основе кластера;
CMF	Cluster management protocol — протокол управления кластером;
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance — многостанционный доступ с контролем несущей и предотвращением конфликтов;
CW	Contention Window — конкурентное окно;
D2D	Device-to-Device — устройство-устройству;
DSRC	Dedicated Short Range Communication — выделенная связь на короткие расстояния;
DTN	Delay-Tolerant Networking — сеть устойчивая к задержкам;
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access — механизм расширенного распределенного доступа к каналу
EDGE (EGPRS)	Enhanced Data rates for GSM Evolution — цифровая технология беспроводной передачи данных для мобильной связи, которая функционирует как надстройка над 2G и 2.5G (GPRS)-сетями;
FANET	Flying Ad-Hoc Network — летающая целевая сеть;
FUSN	Flying Ubiquitous Sensor Network — летающая сенсорная сеть;
GPRS	General Packet Radio Service — «пакетная радиосвязь общего пользования» — надстройка над технологией

	мобильной связи GSM, осуществляющая пакетную передачу данных;
GSM	Global System for Mobile Communications — глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени и частоте;
GPS	Global Positioning System – система глобального позиционирования;
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers — Институт инженеров электротехники и электроники;
IEEE1609.x	Стандарт беспроводного доступа для среды транспортного средства;
IEEE802.11a/n/ac	Стандарт беспроводной связи;
IEEE802.11s	Стандарт беспроводной связи для многосвязных сетей (включает в себя протокол HWMP);
IEEE802.11p	Стандарт беспроводной связи для передачи информации между высокоскоростными транспортными средствами и объектами транспортной инфраструктуры с целью создания интеллектуальной транспортной системы.
IEEE 802.15.4	Стандарт, который определяет физический слой и управление доступом к среде для беспроводных персональных сетей с низким уровнем скорости;
IETF	Internet Engineering Task Force — Инженерный совет Интернета;
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020 — Международная мобильная связь — название, используемое в МСЭ для стандартов 5G;
IntraCP	Intra-cluster communication protocol — протокол связи внутри кластера;
InterCP	Inter-cluster communication protocol — протокол связи между кластерами;
IoT	Internet of Things — Интернет вещей.
IP	Internet Protocol — межсетевой протокол;
ITU	International Telecommunication Union — Международный союз электросвязи;
IUDI	Inter-cluster UDI — пакет обновления информации между кластерами;

LoRA	Long Range wide-area networks — технология беспроводной связи с большим радиусом действия;
LPWAN	Low power Wide area Network — крупномасштабные малопотребляющие сети;
LTE	Long Term Evolution — «долговременная эволюция» — стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных для мобильных телефонов и других терминалов, работающих с данными;
MANET	Mobile Ad-Hoc Network — мобильная целевая сеть;
MBS	Mobile base stations — мобильная базовая станция;
M2M	Machine-to-Machine — межмашинное взаимодействие;
NB-IoT	Narrow Band Internet of Things — стандарт сотовой связи для устройств телеметрии с низкими объёмами обмена данными;
NGN	Next Generation Networks — сети следующего поколения;
OSI	Open System Interconnection — модель взаимодействия открытых систем;
P2P	Point-to-Point — соединение «точка — точка»;
QE	Qualified Equipment — устройство тестирования;
QoE	Quality of experience — качество восприятия;
QoS	Quality of Service — качество обслуживания;
RFID	Radio Frequency Identification — радиочастотная идентификация;
RPL	Routing Protocol for LLNs — протокол маршрутизации для сетей с низким энергопотреблением и потерями;
RSSI	Receiver Strength Signal Indicator — показатель уровня мощности принимаемого сигнала;
RTT	Round-Trip Time — время приема-передачи (круговая задержка);
SCH	Service Channel — служебный канал;
SCH1	Интервал SCH;
SDN	Software Defined Networks;
SDR	Software Defined Radio — Программно определяемая радиосистема;
SI	Synchronization Interval — интервал синхронизации;
SIFS	Short Interframe Space — расстояние между кадрами данных;

ST	Schedule of transmissions — пакет обновления расписания обмен данными;
STA	Station — станция;
TCP	Transmission Control Protocol — протокол транспортного уровня модели OSI с повторным запросом потерянных данных и контролем перегрузок;
TDMA	Time-division multiple access — множественный доступ с разделением по времени;
TTL	Time-to-Live — поле IP- заголовка;
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter — универсальный асинхронный приемопередатчик;
UAS	Unmanned Aerial System — беспилотная летательная система;
UAV	Unmanned Aerial Vehicle — беспилотный летательный аппарат;
UDI	Update-information Packet — пакет обновления информации;
UDP	User Datagram Protocol — протокол транспортного уровня модели OSI без гарантированной передачи данных;
USN	Ubiquitous Sensor Networks — всепроникающие сенсорные сети;
UTC	Coordinated Universal Time — всемирное координированное время;
V2I	Vehicular-to-Infrastructure — соединение «автомобиль — фиксированная инфраструктура»;
V2V	Vehicular-to-Vehicular — соединение «автомобиль — автомобиль»;
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network — автомобильная целевая сеть;
VoWi-Fi	Voice over Wi-Fi — технология, позволяющая делать голосовые вызовы со своего номера и посылать сообщения SMS с помощью смартфона, находящегося в зоне покрытия Wi-Fi;
WAVE	Wireless Access for the Vehicular Environment — беспроводный доступ для среды транспортного средства;
WBAN	Wireless body area network — беспроводные нательные сети;
WEP	Wired Equivalent Privacy — алгоритм для обеспечения безопасности сетей Wi-Fi;
WSA	WAVE Service Advertising — WAVE сервисное объявление;
WSM	WAVE Short Message — WAVE короткое сообщение;
WSN	Wireless Sensor Network — беспроводная сенсорная сеть;

LTE	Long-Term Evolution — стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных;
MAC	Media Access Control — подуровень канального уровня модели OSI;
MCS	Modulation and Coding Scheme — Схема модуляции и кодирования в стандарте 802.11;
RFC	Request for Comments — документация по протоколам связи от Инженерного совета Интернета (IETF);
TCP	Transmission Control Protocol — протокол транспортного уровня модели OSI с повторным запросом потерянных данных и контролем перегрузок;
UDP	User Datagram Protocol — протокол транспортного уровня модели OSI без гарантированной передачи данных;
USB	Universal Serial Bus — последовательный интерфейс передачи данных;
Wi-Fi	Торговая марка для беспроводных сетей на базе стандарта IEEE 802.11;
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access — технология высокоскоростной беспроводной связи;
WMN	Wireless Mesh Network — беспроводные сети с многосвязной топологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кучерявый, А. Е. Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2013. — № 1. — С. 21–24.
- [2] Росляков, А. В. Интернет Вещей / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков, М. Ю. Самсонов // Самара: ШУТИ — 2014. — 340 с.
- [3] Киричек, Р. В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2014. — № 4. — С. 29–41.
- [4] Кучерявый, А. Е. Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый // СПб: Типография «Любавич», 2011. 312 с.
- [5] Koucheryavy, A. State of the art and research challenges for public flying ubiquitous sensor networks / A. Koucheryavy, A. Vladyko, R. Kirichek // In Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham. — 2015. — pp. 299–308.
- [6] Marconato, E. A. IEEE 802.11n vs. IEEE 802.15.4: a study on Communication QoS to provide Safe FANETs. / E. A. Marconato, J. A. Maxa, D. F. Pigatto, A. S. Pinto, N. Larrieu, K. R. C. Branco // In: 2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W). IEEE. — 2016. — pp. 184–191.
- [7] Hayat, S. Experimental analysis of multipoint to point UAV communications with IEEE 802.11n and 802.11ac / S. Hayat, E. Yanmaz, C. Bettstetter // In: 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE. — 2015. — pp. 1991–1996.
- [8] Zhou, Y. Multi-UAV-aided networks: aerial-ground cooperative vehicular networking architecture / Y. Zhou, N. Cheng, N. Lu, X. S. Shen // IEEE Veh. Technol. Mag. — 2015. — Vol. 10(4). — pp. 36–44.
- [9] Yanmaz, E. Experimental performance analysis of two-hop aerial 802.11 networks. / E. Yanmaz, S. Hayat, J. Scherer, C. Bettstetter // In: 2014 IEEE Wireless

- Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE. — 2014. — pp. 3118–3123.
- [10] Rawashdeh, Z. Y. Media access technique for cluster-based vehicular ad hoc networks / Z. Y. Rawashdeh, S. M. Mahmud // In: 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference. IEEE. — 2008. — pp. 1–5.
- [11] Almalag, M. S. TDMA cluster-based MAC for VANETs (TC-MAC) / M. S. Almalag, S. Olariu, M. C. Weigle // In: 2012 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE. — 2012. — pp. 1–6.
- [12] Torabi, N. Survey of medium access control schemes for intervehicle communications / N. Torabi, B. S. Ghahfarokhi // *Comput. Electr. Eng.* — 2017. — Vol. 64. — pp. 450–472.
- [13] Kirichek, R. Flying ubiquitous sensor networks as a queueing system / R. Kirichek, A. Paramonov, A. Koucheryavy // In 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE. — 2015. — pp. 127–132.
- [14] Kirichek, R. Swarm of public unmanned aerial vehicles as a queueing network / R. Kirichek, A. Paramonov, A. Koucheryavy // In International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. Springer, Cham. — 2015. — pp. 111–120.
- [15] Kirichek, R. Software-defined architecture for flying ubiquitous sensor networking / R. Kirichek, A. Vladyko, A. Paramonov, A. Koucheryavy // In 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE. — 2017. — pp. 158–162.
- [16] Sharma, V. Energy efficient device discovery for reliable communication in 5G-based IoT and BSNs using unmanned aerial vehicles / V. Sharma, F. Song, I. You, M. Atiquzzaman // *Journal of Network and Computer Applications.* — 2017. — Vol. 97. — pp. 79–95.
- [17] Sakano, T. Disaster-resilient networking: a new vision based on movable and deployable resource units / T. Sakano, Z. M. Fadlullah, T. Ngo, H. Nishiyama, M.

- Nakazawa, F. Adachi, S. Kurihara // *IEEE Network*. — 2013. — Vol. 27(4). — pp. 40–46.
- [18] Motlagh, N. H. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives / N. H. Motlagh, T. Taleb, O. Arouk // *IEEE Internet of Things Journal*. — 2016. — Vol. 3(6). — pp. 899–922.
- [19] Sánchez-García, J. A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario / J. Sánchez-García, D. G. Reina, S. L. Toral // *Future Generation Computer Systems*. — 2019. — 90. — pp. 129–148.
- [20] Niedzielski, T. A real-time field experiment on search and rescue operations assisted by unmanned aerial vehicles / T. Niedzielski, M. Jurecka, B. Miziński, J. Remisz, J. Ślopek, W. Spallek, M. Świerczyńska-Chłaściak // *Journal of Field Robotics*. — 2018. — 35(6) — pp. 906–920.
- [21] Taleb, T. A novel middleware solution to improve ubiquitous healthcare systems aided by affective information / T. Taleb, D. Bottazzi, N. Nasser // *IEEE transactions on information technology in biomedicine*. — 2010. — 14(2). — pp. 335–349.
- [22] Taleb, T. Angelah: a framework for assisting elders at home / T. Taleb, D. Bottazzi, M. Guizani, H. Nait-Charif // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. — 2009. — 27(4). — pp. 480–494.
- [23] Hanna, D. Using unmanned aerial vehicles (UAVs) in locating wandering patients with dementia / D. Hanna, A. Ferworn, M. Lukaczyn, A. Abhari, J. Lum // In 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). IEEE. — 2018. — pp. 809–815.
- [24] Rasmussen, N. D. Fused visible and infrared video for use in wilderness search and rescue / N. D. Rasmussen, B. S. Morse, M. A. Goodrich, D. Eggett // In 2009 Workshop on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE. — 2009. — pp. 1–8.
- [25] Munoz-Castaner, J. Your phone as a personal emergency beacon: A portable GSM base station to locate lost persons / J. Munoz-Castaner, P. C. Soto, F. Gil-

- Castineira, F. J. Gonzalez-Castano, I. Ballesteros, A. Di Giovanni, P. C. Villar // IEEE Industrial Electronics Magazine. — 2015. — 9(4). — pp. 49–57.
- [26] Ho, Y. H. Krypto: assisting search and rescue operations using Wi-Fi signal with UAV / Y. H. Ho, Y. R. Chen, L. J. Chen // In Proceedings of the first workshop on micro aerial vehicle networks, systems, and applications for civilian use. — 2015. — pp. 3–8.
- [27] Wang, W. Feasibility study of mobile phone Wi-Fi detection in aerial search and rescue operations / W. Wang, R. Joshi, A. Kulkarni, W. K. Leong, B. Leong // In Proceedings of the 4th Asia-Pacific workshop on systems. — 2013. — pp. 1–6.
- [28] Goodrich, M. A. Using a mini-uav to support wilderness search and rescue: Practices for human-robot teaming / M. A. Goodrich, J. L. Cooper, J. A. Adams, C. Humphrey, R. Zeeman, B. G. Buss // In 2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. IEEE. — 2007. — pp. 1–6.
- [29] Guo, Z. Coverage probability of multiple UAVs supported ground network / Z. Guo, Z. Wei, Z. Feng, N. Fan // Electronics Letters. — 2017. — 53(13). — pp. 885–887.
- [30] Mohibullah, W. Stigmergic search for a lost target in wilderness / W. Mohibullah, J. Simon // Sensor Signal Processing for Defence (SSPD 2011). — 2011. — pp. 31–35.
- [31] Chowdhury, M. M. U. RSS-based Q-learning for indoor UAV navigation / M. M. U. Chowdhury, F. Erden, and I. Guvenc // arXiv preprint arXiv: 1905.13406. — 2019. — P.7.
- [32] Singh, S. K. A Comprehensive Survey on FANET: Challenges and Advancements / S. K. Singh // International Journal of Computer Science and Information Technologies. — 2015. — Vol. 6. — № 3. — P. 2010–2013.
- [33] Захаров, М. В. Задача распределения ресурсов в группах БПЛА / М. В. Захаров, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2015. — № 1. — С. 62–70. 115.
- [34] de Freitas, E. P. UAV relay network to support WSN connectivity / E. P. de Freitas, T. Heimfarth, I. Netto et al. // In International Congress on Ultra Modern

- Telecommunications and Control Systems. IEEE. — 2015. — Vol. 115 — pp. 309–314.
- [35] Futahi, A. Ubiquitous sensor networks in the heterogeneous LTE network / A. Futahi, A. Koucheryavy, A. Paramonov, A. Prokopiev // In: Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2015, Phoenix Park, Korea. — 2015. — pp. 28–32.
- [36] Семенов, Ю. В. Умные всепроникающие сети / Ю. В. Семенов, А. Е. Кучерявый, В. О. Пяттаев // 14 Всероссийский форум «Развитие телекоммуникаций в России», Сочи, 26–27 апреля 2011 г.: материалы форума. — М. : ЗАО «Экспо — Телеком». — 2011. — С. 44–47.
- [37] Кучерявый, А. Е. Летающие сенсорные сети — новое приложение Интернета вещей / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах. — СПб.: СПбГУТ, 2015. — С. 17–22.
- [38] 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.
- [39] Кучерявый, А. Е. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / А. Е. Кучерявый, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2014. — №4. — С. 29–41.
- [40] Кучерявый, А. Е. Летающие сенсорные сети / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, А. И. Богданов, А. А. Дорг-Гольц // Электросвязи. — 2014. — №9. — С. 2–5.
- [41] Пирмагомедов, Р. Я. Живые организмы в киберпространстве-проект «Биодрайвер» / Р. Я. Пирмагомедов, Е. А. Кучерявый, Р. И. Глушаков, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2016. — №1. — С. 47.

- [42] Лихтциндер, Б. Я. Беспроводные сенсорные сети / Б. Я. Лихтциндер, Р. В. Киричек, Е. Д. Федотов и др. // Издательство: М.: Горячая линия – Телеком. Учебное пособие для вузов. — 2020. — 236 с.
- [43] Динь, Ч. З. Разработка и исследование методов инсталляции беспроводных сенсорных узлов с беспилотного летательного аппарата / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016). Москва. — 2016. — С. 114–121.
- [44] 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.
- [45] 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). — pp. 1065–1082.
- [46] Agiwal, M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey / M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2016. — Vol. 18(3). — pp. 1617–1655.
- [47] Williams, M. Fuel cell keeps drones in flight for hours, not minutes / M. Williams // [Электронный ресурс]
URL:<http://www.theverge.com/2015/12/15/10220456/intelligent-energy-hydrogen-fuel-cell-drone> (дата обращения 15.03.2016).
- [48] Gupta, L. Survey of important issues in UAV communication networks / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2016. — Vol. 18(2). — pp. 1123–1152.
- [49] Pöttner, W. B. Data elevators: Applying the bundle protocol in delay tolerant wireless sensor networks / W. B. Pöttner, F. Büsching, G. Von Zengen, L. Wolf // In Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). IEEE 9th International Conference on. — 2012. — pp. 218-226.
- [50] Kirichek, R. Internet of Things laboratory test bed / R. Kirichek, A. Koucheryavy // Lecture Notes in Electrical Engineering. — 2016. — Vol. 348. — pp. 485–494.

- [51] Кучерявый, А. Е. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. — 2005. — №5. — С. 10–11.
- [52] 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(11). — С. 17–26.
- [53] Назаренко, А. П. Использование летающих систем Интернета вещей до, вовремя и после катастрофической фазы ЧС / А. П. Назаренко, В. К. Сарьян, А.С. Лутохин // Электросвязь. — 2015. — № 7. — С. 12–15.
- [54] Ватсо, М. Satellites, UAVs, Vehicles and Sensors for an Integrated Delay Tolerant Ad Hoc Network / М. Ватсо, L. Caviglione, A. Gotta // In International Conference on Personal Satellite Services. Springer, Cham. — 2016. — pp. 114–122.
- [55] Wang, J. Taking drones to the next level: Cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones / J. Wang, C. Jiang, Z. Han et al. // IEEE vehicular technology magazine. — 2012. — Vol. 12(3). — P. 73–82.
- [56] Deaconu, I. Mobile gateway for wireless sensor networks utilizing drones / I. Deaconu, A. Voinescu // In RoEduNet Conference 13th Edition: Networking in Education and Research Joint Event RENAM 8th Conference. — 2014 — P. 1–5.
- [57] Morgenthaler, S. UAVNet: A mobile wireless mesh network using unmanned aerial vehicles / S. Morgenthaler, T. Braun, Z. Zhao et al. // In Globecom Workshops (GC Wkshps). — 2012. — P. 1603–1608.
- [58] Kim, D. H. Low-Power, Long-Range, High-Data Transmission Using Wi-Fi and LoRa / D. H. Kim, J. Y. Lim, J. D. Kim // In IT Convergence and Security (ICITCS). 6th International Conference on. — 2016. — P. 1–3.
- [59] Динь, Ч. З. Исследование инсталляции беспроводных сенсорных узлов с беспилотных летательных аппаратов различного типа / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // В сб. научных статей V Междунар. науч.-техн. и науч.-методич. конф. «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». — 2016. — С. 344–348.

- [60] Xu, D. A priority differentiated and multi-channel MAC protocol for airborne networks / D. Xu, H. Zhang, B. Zheng, L. Xiao // In: 2016 8th IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). IEEE. — 2016. — pp. 64–70.
- [61] IEEE Standards Association. 802.11p-2010-IEEE standard for information technology-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 6: wireless access in vehicular environments (2010). <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11p-2010.html>.
- [62] Park, J. H. Unmanned aerial system traffic management with WAVE protocol for collision avoidance / J. H. Park, S. C. Choi, J. Kim, K. H. Won // In: 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). — 2018. — pp. 8–10.
- [63] Pu, C. Jamming-resilient multipath routing protocol for flying ad hoc networks / C. Pu // IEEE Access 6. — 2018. — pp. 68472–68486.
- [64] IEEE 1609 Working Group. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-Multi-Channel Operation. IEEE Std (2016): 1609-4.
- [65] Uzcategui, R. A. Wave: a tutorial / R. A. Uzcategui, A. J. De Sucre, G. Acosta-Marum // IEEE Commun. Mag. — 2009. — Vol. 7(5) — pp. 126–133.
- [66] Sun, W. Analytical study of the IEEE 802.11p EDCA mechanism / W. Sun, H. Zhang, C. Pan, J. Yang // In: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE (2013). — 2013. — pp. 1428–1433.
- [67] Eichler, S.: Performance evaluation of the IEEE 802.11p WAVE communication standard / S. Eichler // In: 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference. — 2007. — pp. 2199–2203.
- [68] Kenney, J. B. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States / J. B. Kenney // Proc. IEEE — 2011. — Vol. 99(7) — pp. 1162–1182.

- [69] Bazzi, A. On the performance of IEEE 802.11p and LTE-V2V for the cooperative awareness of connected vehicles / A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella, I. Thibault // *IEEE Trans. Veh. Technol.* — 2017. — Vol. 66(11) — pp. 10419–10432.
- [70] Friis, H. T. A note on a simple transmission formula / H. T. Friis // *Proceedings of the IRE.* — 1946. — Vol. 34(5) — pp. 254–256.
- [71] Park, J. H. Analysis of dynamic cluster head selection for mission-oriented flying ad hoc network / J. H. Park, S. C. Choi, H. R. Hussen, J. Kim // In: *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE. — 2017. — pp. 21–23.
- [72] Torabi, N. Survey of medium access control schemes for intervehicle communications / N. Torabi, B. S. Ghahfarokhi // *Comput. Electr. Eng.* — 2017. — Vol. 64 — pp. 450–472.
- [73] Mammu, A. S. K. Cluster-based MAC in VANETs for safety applications / A. S. K. Mammu, U. Hernandez-Jayo, N. Sainz // In: *2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. — 2013. — pp. 1424–1429.
- [74] Hadded, M. TDMA based MAC protocols for vehicular ad hoc networks: a survey, qualitative analysis, and open research issues / M. Hadded, P. Muhlethaler, A. Laouiti, R. Zagrouba, L. A. Saidane // *IEEE Commun. Surv. Tutor.* — 2015. — Vol. 17(4) — pp. 2461–2492.
- [75] ITU-T Rec. Y.1541: Network performance objectives for IP-based services. International Telecommunication Union, ITU-T. — 2003.
- [76] Serrano, P. Optimal configuration of 802.11e EDCA for real-time and data traffic / P. Serrano, A. Banchs, P. Patras, A. Azcorra // *IEEE Trans. Veh. Technol.* — 2010. — Vol. 59(5) — pp. 2511–2528.
- [77] Serrano, P. Optimal configuration of 802.11e EDCA under voice traffic / P. Serrano, A. Banchs, J. F. Kukielka // In: *IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference*. — 2007. — pp. 5107–5111.
- [78] Banchs, A. Throughput analysis and optimal configuration of 802.11e EDCA / A. Banchs, L. Vollerero // *Comput. Netw.* — 2006. — Vol. 50(11) — pp. 1749–1768.

- [79] Мухизи, С. Исследование моделей балансировки нагрузки в программно-конфигурируемых сетях / С. Мухизи, А. С. Мутханна, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // *Электросвязь*. — 2019. — № 1. — С. 23–29.
- [80] Атея, А. А. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А. А. Атея, А. С. Мутханна, А. Е. Кучерявый // *Электросвязь*. — 2019. — № 3. — С. 34–40.
- [81] Yastrebova A. Future Networks 2030: Architecture and Requirements / A. Yastrebova, R. Kirichek, Y. Koucheryavy, A. Borodin, A. Koucheryavy // In 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE. — 2018. — pp. 1–8.
- [82] Ateya, A. A. Development of Intelligent Core Network for Tactile Internet and Future Smart Systems / A. A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova, A. Abuarqoub, A. Vybornova, A. Koucheryavy // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. — 2018. — Vol. 7(1) — P. 1.
- [83] RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks: RFC 6550. March 2012.
- [84] IEEE Std 802.15.4-2011. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). NY: IEEE, 2011.
- [85] ZigBee Alliance (01/2008). ZigBee Specification (Document 053474r17).
- [86] Varga, A. An overview of the OMNeT++ simulation environment / A. Varga, R. Hornig // In Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). — 2008. — p. 60.
- [87] Bluetooth SIG. Bluetooth Mesh networking specification.v.1.0. Source: <https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications>. Last accessed 14 Apr 2018.

- [88] Bluetooth SIG. Bluetooth 5 Core Specification, Version 5. 06/12/2016. Source: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>. Last accessed 14 Apr 2018.
- [89] Bacco, M. IEEE 802.15.4 air-ground UAV communications in smart farming scenarios / M. Bacco, A. Berton, A. Gotta, L. Caviglione // IEEE Communications Letters. — 2018. — Vol. 22(9). — pp. 1910–1913.
- [90] Ilic, A. Augmented Reality and the Internet of Things / A. Ilic, E. Fleisch // ETH Zurich. — 2016.
- [91] Yuen, S. C. Y. Augmented reality: An overview and five directions for AR in education / S. C. Y. Yuen, G. Yaoyuneyong, E. Johnson // Journal of Educational Technology Development and Exchange (JETDE). — 2011. — Vol. 4(1) — pp. 119–140.
- [92] Makolkina, M. The Use of UAVs, SDN, and Augmented Reality for VANET Applications / M. Makolkina, A. Paramonov, A. Vladyko, R. Dunaytsev, R. Kirichek, A. Koucheryavy // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering (aiie). — 2017. — pp. 364–368.
- [93] Makolkina, M. Investigation of Traffic Pattern for the Augmented Reality Applications / M. Makolkina, A. Koucheryavy, A. Paramonov // Lecture Notes in Computer Science. — 2017. — Vol. 10372 — pp. 233–246.
- [94] Paramonov, A. Clustering Optimization for Out-of-Band D2D Communications / A. Paramonov, O. Hussain, K. Samouylov, A. Koucheryavy, R. Kirichek, Y. Koucheryavy // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2017. — Vol. 2017. — 11 p.
- [95] [AnyLogic] AnyLogic: <https://www.anylogic.com/>
- [96] Woolley, M.: Bluetooth SIG. Bluetooth 5 Go Faster. Go Future. Source: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/bluetooth5/bluetooth5-paper>. Last accessed 14 Apr 2018.
- [97] Kleinrock, L. Queueing systems, Vol. 1: Theory / L. Kleinrock // J. Wiley and Sons. — 1975. — 448 p.

- [98] Da Conceicao, A. F. Is IEEE 802.11 ready for VoIP? / A. F. Da Conceicao, J. Li, D. A. Florencio, F. Kon // In *Multimedia Signal Processing, IEEE 8th Workshop on.* — 2017. — pp. 108-113.
- [99] Chagh, Y. Voice service in 5G network: Towards an edge-computing enhancement of voice over Wi-Fi / Y. Chagh, Z. Guennoun, Y., Jouihri // In *Telecommunications and Signal Processing (TSP), 39th International Conference on.* — 2016. — pp. 116-120.
- [100] Ngongang, S. F. M. Voice over Wi-Fi: feasibility analysis / S. F. M. Ngongang, N. Tadayon, G. Kaddoum, // In *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO).* — 2016. — pp. 133-138.
- [101] IEEE Standards Association. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE std, 802 (2012).
- [102] Киричек, Р. В. Беспилотный летательный аппарат как система массового обслуживания / Р. В. Киричек, А. И. Парамонов // *Электросвязь.* — 2015. — № 7. — С. 16–19.
- [103] Kirichek, R. Long-range data transmission on flying ubiquitous sensor networks (FUSN) by using LPWAN protocols / R. Kirichek, V. Kulik // *Communications in Computer and Information Science (CCIS).* — 2016. — Vol. 678. — P. 442–453.
- [104] Kulik, V. The study of semantic gateway performance / V. Kulik, A. Muthanna, V. D. Pham, A. Hakimov, R. Kirichek, R. Pirmagomedov // *Электросвязь.* — 2017. — № 6. — С. 69–73.
- [105] Weisstein Eric, W. Circle line picking // From MathWorld – A Wolfram Web Resource (2004). [Онлайн ресурс] – <http://mathworld.wolfram.com/CircleLinePicking> (дата обращения 06.11.2017).
- [106] Shilin, P. Connectivity of VANET segments using UAVs / P. Shilin, R. Kirichek, A. Paramonov, A. Koucheryavy // *Lecture Notes in Computer Science (LNCS).* — 2016. — Vol. 9870. — pp. 492–500.
- [107] Шилин, П. А. Исследование использования БПЛА как временного узла сети VANET / П. А. Шилин, Р. В. Киричек // *Электросвязь.* — 2016. — № 9. — С. 54–57.

- [108] Kim, S. Y. Channel estimation scheme for the enhanced reliability in the flying ad-hoc network / S. Y. Kim, J. H. Ro, H. K. Song // *Int. J. Eng. Res. Appl.* — 2017. — Vol. 7(4). — pp. 63-66.
- [109] Union, I. T. ITU-T recommendation G. 114: One-way transmission time / I. T. Union // *tech. rep.*, 5 2003. — 2003.
- [110] Kleinrock, L. Queueing systems, volume 2: Computer applications / L. Kleinrock // New York: Wiley. — 1976. — Vol. 66. — 576 p.
- [111] Cecchini, G. Performance comparison between IEEE 802.11 p and LTE-V2V in-coverage and out-of-coverage for cooperative awareness / G. Cecchini, A. Bazzi, B.M. Masini, et al. // *In Vehicular Networking Conference (VNC). IEEE.* — 2017. — pp. 109-114.
- [112] Wang, Q. An IEEE 802.11 p-based multichannel MAC scheme with channel coordination for vehicular ad hoc networks / Q. Wang, S. Leng, H. Fu, et al. // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* — 2012. — 13(2) — pp. 449-458.
- [113] Anwer, M. S. A survey of VANET technologies / M. S. Anwer, C. Guy // *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences.* — 2014. — 5(9) — pp. 661-671.
- [114] Dinh, T. D. Flying Ad-Hoc Network for Emergency Based on IEEE 802.11 p Multichannel MAC Protocol / T. D. Dinh, D. T. Le, T. T. T. Tran, R. Kirichek // *In International Conference on Distributed Computer and Communication Networks.* Springer, Cham. — 2019. — pp. 479-494.
- [115] Dinh, T. D. Positioning Methods Based on Flying Network for Emergencies / R. Kirichek, T. D. Dinh, V. D. Pham, M. Zakharov, D. T. Le, A. Koucheryavy // *22th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2020. IEEE.* — 2020. — P. 245–250.
- [116] Динь, Ч. З. Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений дополненной реальности на базе беспроводной сенсорной сети / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина // *Труды учебных заведений связи.* — 2019. — № 5(2). — С. 76–87.

- [117] Dinh, T. D. Method for organizing mesh topology based on LoRa technology / V. D. Pham, T. D. Dinh, R. Kirichek // In 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE. — 2018. — P. 1–6.
- [118] Динь, Ч. З. Применение установленных на БПЛА систем обнаружения GSM-устройств для поиска пострадавших в результате ЧС / Д. И. Думин, Ч. З. Динь, В. Д. Фам, Р. В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2018. — № 6(2). — С. 62–69.
- [119] Динь, Ч. З. Необходимость создания протокола для взаимодействия между беспилотными летательными аппаратами / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // В 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. — 2018. — С. 207–208.
- [120] Dinh, T. D. Transmission of augmented reality contents based on BLE 5.0 mesh network / M. Makolkina, T. D. Dinh, A. Ryzhkov, R. Kirichek // In Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham. — 2018. — pp. 394–404.
- [121] Динь, Ч. З. Использование летающих гетерогенных шлюзов в сетях 5G/ITM-2020 / Ч. З., Динь, Р. В. Киричек // In Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ-2017). — 2017. — pp. 112–115.
- [122] IEEE Std. 802.1X-2004. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Port-Based Network Access Control. — 2001.
- [123] Aboba, B. Analysis of Roaming Techniques / B. Aboba, A. Alimian // IEEE 802.11-04/0377r1. — 2004.
- [124] Bohák, A. An authentication scheme for fast handover between Wi-Fi access points / A. Bohák, L. Buttyán, L. Dóra // In Proc. of ACM Wireless Internet Conference (WICON). — 2007.
- [125] Haverinen, H. Extensible authentication protocol method for global system for mobile communications (GSM) subscriber identity modules (EAP-SIM) / H. Haverinen, J. Salowey // No. RFC 4186. — 2005.

- [126] Jiang, D. Optimal data rate selection for vehicle safety communications / D. Jiang, Q. Chen, L. Delgrossi // In Proceedings of the fifth ACM international workshop on VehiculAr Inter-NETworking. — 2008. — pp. 30-38.
- [127] Li, Y. J. An overview of the DSRC/WAVE technology / Y. J. Li // In International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. Springer, Berlin, Heidelberg. — 2010. — pp. 544-558.
- [128] Manual, I. A. M. S. A. R. International aeronautical and maritime search and rescue manual. International Civil Aviation Organization and International Maritime Organization. — 2013.
- [129] Ting, P. Software defined radio (SDR) architecture for wireless digital communication systems / P. Ting, H. M. Wang, N. S. Huang // U.S. Patent No. 7,151,925. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. — 2006.
- [130] Динь, З. Метод организации гетерогенного летающего шлюза для обслуживания устройств Интернета вещей с низким энергопотреблением / З. Динь, Р. В. Киричек // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). — 2017. — С. 204–205.
- [131] Динь, Ч. З. Исследование функционирования быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб / Ч. З. Динь, О. А. Губская, Е. А. Алисевиц, С. В. Данилин, Д. В. Данилин, В. Д. Фам // Электросвязь. — 2018. — №(1). — С. 33–38.
- [132] Динь, Ч. З. Метод взаимодействия БПЛА в быстроразворачиваемых летающих сетях для экстренных служб / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. — 2019. — №(1). — С. 141–143.
- [133] Динь, Ч. З. Разработка моделей взаимодействия БПЛА для быстроразворачиваемых летающих сетей экстренных служб / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019) Сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. — 2019. — С. 394–399.

- [134] Динь, Ч. З. Метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи с использованием летающей сети на базе группы БПЛА / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2020. — № 3. — С. 40–48.
- [135] Dinh, T. D. Unmanned aerial system–assisted wilderness search and rescue mission / T. D. Dinh, R. Pirmagomedov, V. D. Pham, A. A. Ahmed, R. Kirichek, R. Glushakov, A. Vladyko // International Journal of Distributed Sensor Networks. — 2019. — Vol. 15(6) —1550147719850719.
- [136] Draft Recommendation ITU-T Q.ETN-DS Signalling architecture of the fast deployment emergency telecommunication network to be used in a natural disaster, 2020.
- [137] Динь, Ч. З. Разработка и исследование методов инсталляции беспроводных сенсорных узлов с беспилотного летательного аппарата / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN2016). Москва. — 2016. — pp. 114–121.
- [138] Bekmezci, I. Connected multi UAV task planning for flying ad hoc networks / I. Bekmezci, E. Murat, K. Sezgin // In 2014 IEEE international black sea conference on communications and networking (BlackSeaCom). — 2014. — pp. 28–32.
- [139] Dinh, T. D. Flying network for emergencies / T. D. Dinh, V. D. Pham, R. Kirichek, A. Koucheryavy // In International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. Springer, Cham. — 2018. — pp. 58–70.
- [140] Динь, Ч. З. Летающая сеть для экстренных служб / Ч. З. Динь, В. Д. Фам, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2018). — 2018. — С. 323-333.
- [141] Динь, Ч. З. Подходы к организации мобильных гетерогенных шлюзов на базе беспилотных летательных аппаратов / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // В Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2017). — 2017. — С. 260-265.

- [142] Динь, Ч. З. Исследование передачи видео на базе технологии IEEE 802.11ad / Ч. З. Динь, Р. В. Киричек // 3-я международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2017)». — 2017. — С. 176-180.
- [143] Ramankutty, R. Combined gateway for network communications / R. Ramankutty, R. Velandy, S. K. Puthiyandyil // U.S. Patent No. 8,363,664. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. — 2013.
- [144] Sharma, V. A cooperative network framework for multi-UAV guided ground ad hoc networks / V. Sharma, K. Rajesh // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2015. — 77(3-4). — pp. 629–652.
- [145] Bekmezci, I. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey / I. Bekmezci, K. S. Ozgur, T. Şamil // Ad Hoc Networks. — 2013. — 11(3). — pp. 1254–1270.
- [146] Munoz-Castaner, J. Your phone as a personal emergency beacon: A portable GSM base station to locate lost persons / J. Munoz-Castaner, P. C. Soto, F. Gil-Castineira et.al. // IEEE Industrial Electronics Magazine. — 2015. — 9(4). — pp. 49–57.
- [147] Mendelson, E. System and method utilizing integral wireless protocols of a mobile phone as an emergency beacon to aid first responders in locating people / E. Mendelson // Patent No. 9,374,673. USA. — 2016.
- [148] Wolfe, V. Detecting and locating cell phone signals from avalanche victims using unmanned aerial vehicles / V. Wolfe, W. Frobe, V. Shrinivasan, T. Y. Hsieh // In Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE. — 2015. — pp. 704–713.
- [149] Yaqoob, I. Enabling communication technologies for smart cities / I. Yaqoob, I. A. T. Hashem, Y. Mehmood, A. Gani, S. Mokhtar, S. Guizani // IEEE Communications Magazine. — 2017. — Vol. 55(1). — pp. 112–120.
- [150] Macker, J. P. Mobile ad hoc networking and the IETF / J. P. Macker, M. S. Corson // ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. — 1998. — Vol. 2(1). — pp. 9–14.
- [151] Le, T. D. A multi-criteria priority-based V2I communication for information dissemination at RSU in VANET / T. D. Le, O. Simonina, M. Buinhevich, A.

- Vladyko // JP Journal of Heat and Mass Transfer, Special Volume, Issue II, Advances in Mechanical System and ICI-convergence. — 2018. — pp. 195–203.
- [152] Sun, N. Performance study of IEEE 802.11p for vehicle to vehicle communications using OPNET / N. Sun // Ph.D. Diss., Massey University. — 2011.
- [153] Viseras, A. Beehive-Inspired Information Gathering with a Swarm of Autonomous Drones / A. Viseras, T. Wiedemann, C. Manss, V. Karolj, D. Shutin, J. Marchal // Sensors. — 2019. — 19, 4349. — pp. 1–20.
- [154] Chung, W. Y. Enhanced RSSI-based real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments / W. Y. Chung // In 2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007), IEEE. — 2007. — pp. 1213-1218.
- [155] Zhu, X. RSSI-based algorithm for indoor localization / X. Zhu, Y. Feng, // Communications and Network. — 2013. — Vol. 5(02). — pp. 37–42.
- [156] Kirichek, R. Transfer of multimedia data via LoRa / R. Kirichek, V. D. Pham, A. Kolehkin, M. Al-Bahri, A. Paramonov // Lecture Notes in Computer Science (LNCS). — 2017. — Vol. 10531. — pp. 708–720.
- [157] Santos, V. G. Multi-uav system architecture for environmental protection area monitoring / V. G. Santos, D. S. Pereira, P. Alsina et al. // Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. — 2019. — 6 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Параметры имитационной модели в пакете Riverbed Modeler для реализации протокола СММрР

В СММрР используется 5 каналов для связи: канал 178 для канала управления, канал 182 для передачи данных между кластерами, каналы 174, 176 и 180 для передачи данных внутри кластера. Теоретически передающиеся по этим каналам данные не будут зависеть друг от друга. Кроме того, СММрР использует два приемопередатчика для каждого типа канала для одновременной многоканальной передачи. Поэтому вместо использования интервалов ССН (ССН) и интервалов SCH (SCH) с длительностью 50 мс для каждого из них мы можем использовать весь интервал синхронизации 100 мс. Чтобы выполнить эту конфигурацию, мы создадим 3 профиля в модуле конфигурации профиля (Profile), в том числе: профиль ССН_head (для интервала ССН узла СН), профиль ССН_node (для интервала ССН нормального узла), профиль SCH (для интервала SCH все узлы) (см. рисунок А.1).

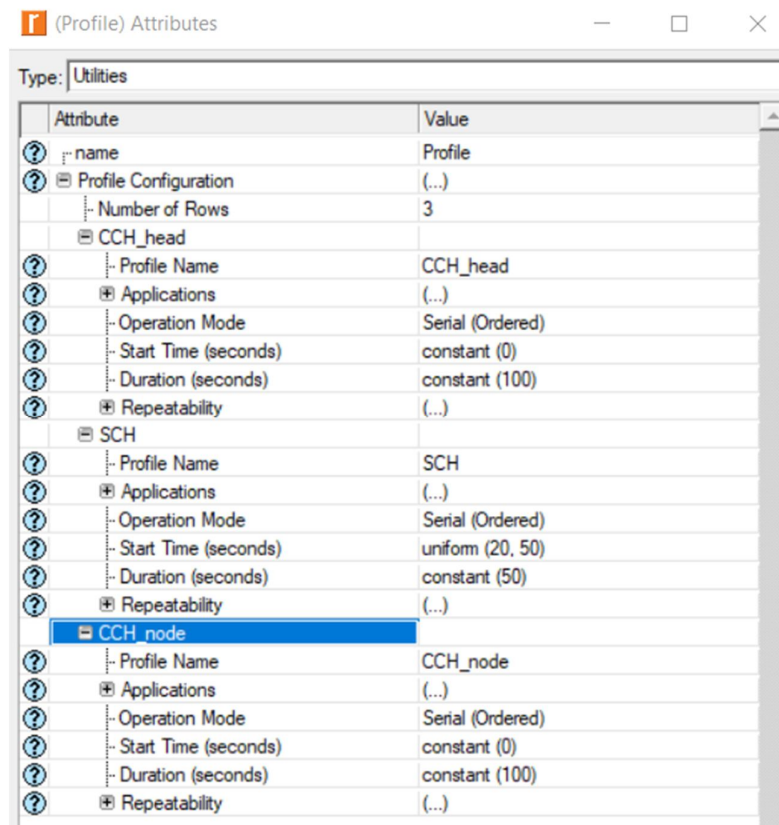


Рисунок А.1. конфигурация профиля

Каждый профиль включает в себя множество различных приложений, в зависимости от каждого сценария моделирования. Рисунок А.2 иллюстрирует смысл конфигурации Приложения (Applications) и Профили (Profiles) в программе: приложения могут реализовываться как в течение процесса моделирования, так и в течение заданного периода времени.

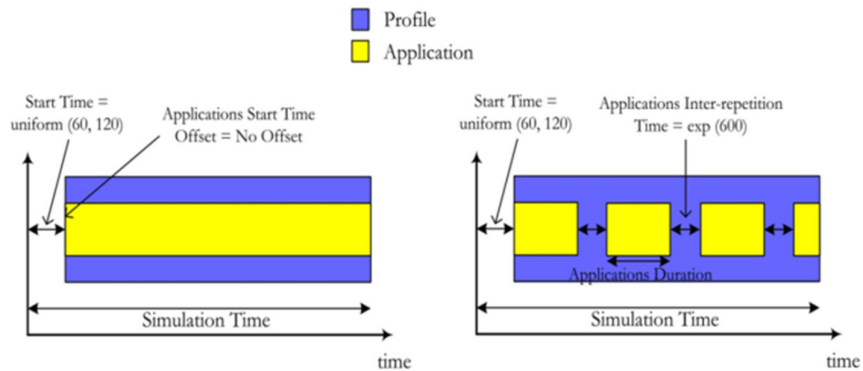


Рисунок А.2. Смысл конфигурации Приложения (Applications) и Профили (Profiles) в программе Riverbed Modeler

В таблице А.1 описаны параметры Wireless LAN точек доступа и станций по умолчанию.

Сценария моделирование с одной центральной БС (CBS), одной МБС (MBS), пятью кластерами, в каждом кластере 16 узлов (node) приведена на рисунке А.3.



Рисунок А.3. Пример сценарии моделирования

Таблица А.1 – параметры Wireless LAN точек доступа и станций по умолчанию

Параметры	Конфигурация
<i>BSS Identifier</i>	Считается ClusterID
<i>Data Rate (802.11p)</i>	12 Mbps
<i>Channel bandwidth (MHz)</i>	10
<i>Min Frequency (MHz)</i>	5885 (для ССН канал)
<i>Transmit Power (W)</i>	0.005
<i>Packet Reception-Power Threshold (dBm)</i>	-95
<i>RTS Threshold (bytes)</i>	None
<i>Fragmentation Threshold (bytes)</i>	None
<i>CTS-to-self Option</i>	Enabled
<i>Short Retry Limit</i>	7
<i>Long Retry Limit</i>	4
<i>AP Beacon Interval (secs)</i>	0.02
<i>Max Receive Lifetime (secs)</i>	0.5
<i>Buffer Size (bits)</i>	256000
<i>Roaming Capability</i>	Disabled
<i>Large Packet Processing</i>	Drop
<i>EDCA parameters</i>	Default (Status: supported)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
 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, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
 Санкт-Петербург, 193232
 Тел. (812) 3263156, Факс: (812) 3263159
 E-mail: rector@sut.ru
 ИНН 7808004760 КПП 784001001
 ОГРН 1027809197635 ОКТМО 40909000

11.03.2018 № _____
 на № _____ от _____

Утверждаю

Проректор по научной работе
 Шестаков А.В.



Акт о внедрении научных результатов, полученных Динь Чыонг Зюи

Комиссия в составе декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем Л.Б. Бузюкова, доцента кафедры сетей связи и передачи данных М.А. Маколкиной и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Динь Чыонг Зюи, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа № 18.05/288-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе Г.М. Машковым 05.07.2018), раздел Программы:
 - Беспроводные сенсорные сети: Летящие сенсорные сети. Медицинские и наносети. Приложения, требования к передаче через сети связи. Основные элементы и принципы их взаимодействия. Архитектура сети.
2. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу Интернет Вещей (Рабочая Программа № 18.05/1198-Д, утверждена Первым проректором

проректором по учебной работе Г.М. Машковым 05.07.2018), раздел Программы:

- Создание предпосылок для появления концепции Интернета Вещей. Интернет будущего – структура. Триллионные сети. Летающие сети. Электромагнитные и молекулярные наносети. Медицинские сети.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Динь Чыонг Зюи в диссертационной работе:

- Метод построения быстроразворачиваемой летающей сети для экстренных служб на базе технологии IEEE 802.11p;
- Метод передачи голосового трафика через быстроразворачиваемую летающую сеть при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи;
- Метод обнаружения координат абонентов при отсутствии инфраструктуры сетей операторов связи с использованием летающей сети на базе группы БПЛА.

Кроме того, научные результаты, полученные Динь Чыонг Зюи были использованы при подготовке вклада СПбГУТ в Сектор Стандартизации Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т):

- ITU-T Q.ETN-DS “Архитектура сигнализации для быстроразворачиваемой сети для использования в случае стихийного бедствия”.

Декан факультета ИКСС
Доцент кафедры ССиПД
Зав. лабораторией кафедры ССиПД

Л.Б.Бузюков
М.А.Маколкина
О.И.Ворожейкина