МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
Кафедра цифровых инженерных технологий

Направление подготовки
27.04.04 «Управление в технических системах»

Направленность
27.04.04.04 «Автоматическое управление в робототехнических системах»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(практико-ориентированная)

на тему

«РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫХ УСТРОЙСТВ»

Работу выполнил

Студент группы ОМ-27.04.04.04-11

_____ И.Р. Горбачев

Научный руководитель
д.т.н., профессор
_____ В.М Колодкин

Нормоконтроль ВКР
_____ Д. М. Варламова

Руководитель направления
д.т.н., профессор
_____ В. М. Колодкин

«___»_____2026

Ижевск 2026

ВКР УдГУ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1 Постановка задачи и анализ области исследования 5

1.1 Структура сетей и типы передачи данных 6

1.2 Организация радиосети 13

1.3 Преимущества и недостатки разных диапазонов частот 15

1.4 Основные виды модуляции и мультиплексирования 19

1.5 Типы шифрования и сокрытия сигнала 23

1.6 Протоколы беспроводной децентрализованной связи 25

1.7 Постановка задачи 28

2 Разработка протокола 30

2.1 Протокол. Общий принцип работы и назначение 30

2.1.1 Создание сети 33

2.1.2 Добавление участника в группу 34

2.1.3 Масштабирование системы 36

2.1.4 Механизмы восстановления и реорганизации сети 38

2.1.5 Использование технологии BitTorrent 40

2.2 Потенциальные преимущества и недостатки использования протокола .. 42

3 Реализация работы протокола 43

3.1 Выбор компонентов 43

3.2 Схема соединения компонентов 45

3.3 Принцип работы технического решения 47

3.4 Проектирование корпуса устройства 53

3.5 Тестирование устройства 56

3.6 Дальнейшая возможная реализация протокола на ПЛИС 58

ВКР УлГУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 60

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 61

ВКР УДГУ

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется широким использованием беспилотных систем. Использование беспилотных устройств воздушного, наземного или водного типа открывает новые возможности для решения повседневных задач. Развитие технологий в данном направлении могут сыграть большую роль во многих отраслях, например: логистика, военное дело, научные исследования, сельское хозяйство. Нужно отметить, что важным фактором применения беспилотных систем в различных областях является их взаимодействия между собой, что возможно при наличии устойчивой системы связи.

С точки зрения автоматизации в робототехнических системах, изучение взаимодействия беспилотных устройств в процессе решения конкретных задач, требует обеспечения оптимальных путей реализации связи между устройствами.

В данной работе будут рассмотрены современные протоколы беспроводной связи и их реализации применительно к беспилотным системам. Будет предложен новый оригинальный протокол связи и прототип его реализации.

ВКР УлГУ

1 Постановка задачи и анализ области исследования

Важным для беспилотных устройств разного назначения является наличие надежной связи между устройствами и внешним источником команд. В настоящее время существует множество протоколов беспроводной связи, созданных под разные задачи. Для беспилотников используют даже те разработки, которые изначально не предусматривались для данного контекста.

Также стоит отметить специфику беспилотных устройств. Она подразумевает под собой: постоянное движение устройств с разной скоростью и изменение местоположения в пространстве, ограниченный запас энергии, различие в размерах и типе беспилотника (воздушный, наземный, надводный, подводный). Это выдвигает особые требования к работе протокола.

Целью работы является разработка оригинального протокола беспроводной децентрализованной системы связи и создание прототипа его технической реализации.

Задачи работы:

– Рассмотреть современное состояние теории радиосвязи и организации сетей;

– Рассмотреть существующие протоколы децентрализованных сетей и их применение в беспилотных системах;

– Предложить новый протокол беспроводной связи децентрализованной сети;

– Предложить прототип технического решения для работы нового протокола.

ВКР УлГУ

1.1 Структура сетей и типы передачи данных

Рассмотрим базовые понятия функционирования беспроводных сетей, которые предполагают тот или иной протокол связи. В общем случае можно выделить два основных подхода к организации структуры сети.

Централизованная система связи подразумевает наличие главного узла сети (Рисунок 1). Клиенты в данной системе подключены к центральному серверу, который выполняет функцию обработки данных и управление сетью [1].

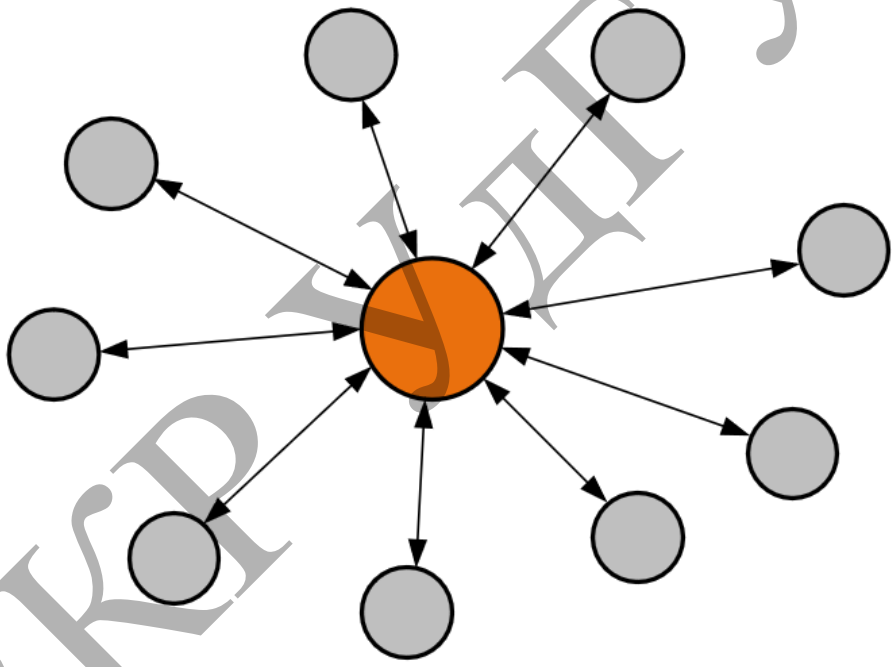


Рисунок 1 – Централизованная система связи

ВКР УлГУ

Рассмотрим преимущества и недостатки централизованного устройства сети.

Преимущества централизованных сетей:

–Система является простой в реализации;

–Структура сети позволяет вести полное управление через центральный узел;

–Легко отследить взаимодействия в сети.

Недостатки централизованных сетей:

–Высокие системные требования к центральному узлу сети;

–При выходе центрального сервера из строя сеть перестает функционировать;

–Уязвимость сети из-за наличия главного узла.

ВКР УлГУ

Децентрализованная сеть в отличие от централизованной сети не полагается на один центральный сервер (Рисунок 2). Каждый узел в отдельности может являться, сервером и клиентом [1]. В данном случае можно сказать о равномерном распределении нагрузки обеспечения работы сети между всеми участниками.

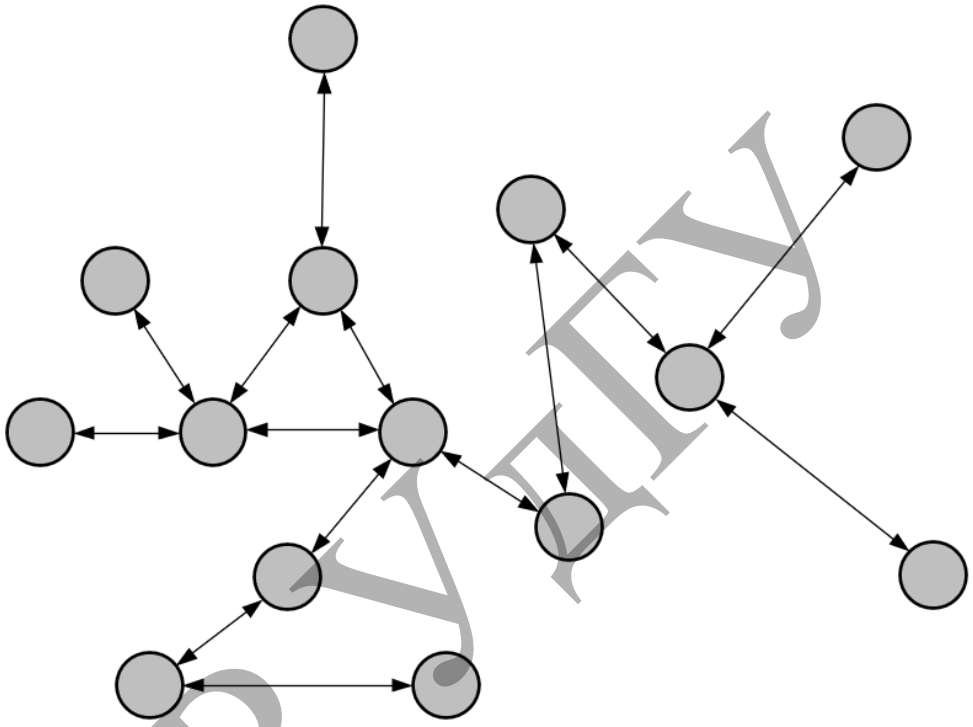


Рисунок 2 – Децентрализованная сеть

Преимущества децентрализованных сетей:

–Устойчивость сети. Возможность реализовать механизмы восстановления сети;

–Возможность обеспечения большей безопасности чем в централизованном типе сети;

–Снижается требования к производительности устройства.

ВКРУИТУ

Недостатки децентрализованных сетей:

–Сложность разработки эффективного алгоритма работы сети;

–Сложность в прослеживании взаимодействий в сети из-за отсутствия центрального узла.

Сложность разработки протокола децентрализованной сети возникает из проработки необходимых организационных механизмов. Централизованная сеть имеет простую линейную структуру и понятую последовательность взаимодействия устройств, из этого следует простая масштабируемость системы. В итоге для протокола требуется небольшое количество механизмов организации. Децентрализованная сеть, не имея «четкой» структуры, уже является более сложной в работе. Необходимо проработать большее количество сценариев работы сети. Разработка эффективного протокола в данном случае усложняется. Это может быть простой задачей при количестве устройств в пределах 10 штук, но будет ли это работать быстро и хорошо при увеличении количества устройств в несколько раз?

Проблему создания децентрализованной сети необходимо рассматривать комплексно, охватив область от физической уровня работы приемопередатчика, до алгоритма поведения устройства в сети. С помощью такого подхода уже можно организовать эффективную работу децентрализованной сети.

ВКР УлГУ

Рассмотрим три основных типа передачи данных: Unicast, Multicast, Broadcast. Это является простой классификацией адресации сообщений в сети.

Unicast – одноадресная передача. Подразумевает направленную передачу информации строго от одного узла к другому [2]. При невозможности прямой связи, другие устройства могут принять на себя роль ретрансляторов. В IP сетях для реализации данного механизма происходит адресация пакета, в зависимости от расположения узлов может происходить множественная переадресация. На рисунке 3 представлен пример одноадресной передачи.

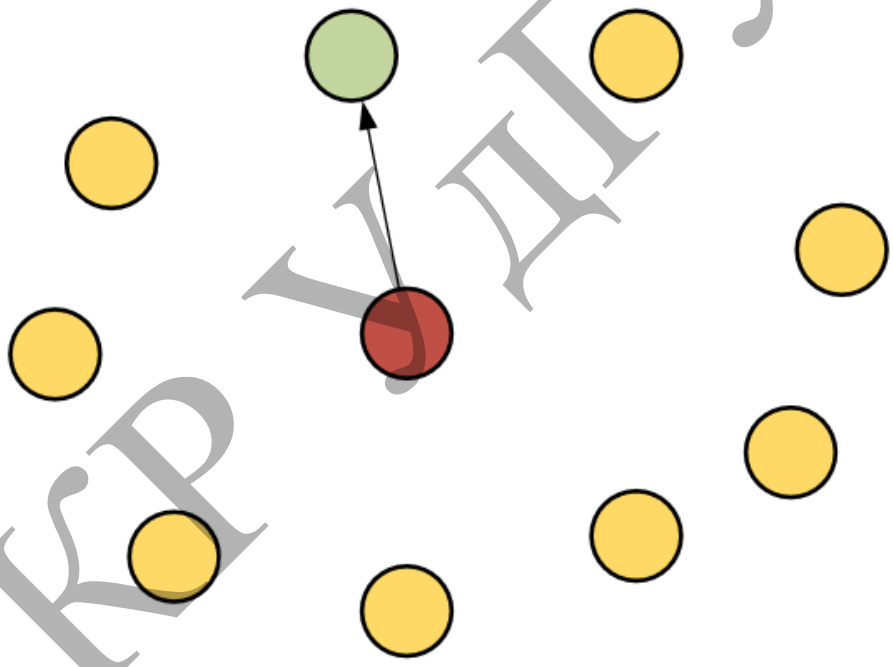


Рисунок 3 – Схема Unicast

ВКР УлГУ

Multicast – многоадресное вещание. Информация передается для определенных участников сети. Все целевые устройства получают копию одной и той же информации [2]. В реализации IP сетей расходуется ресурс пропускной способности сети. На рисунке 4 представлен пример многоадресного вещания.

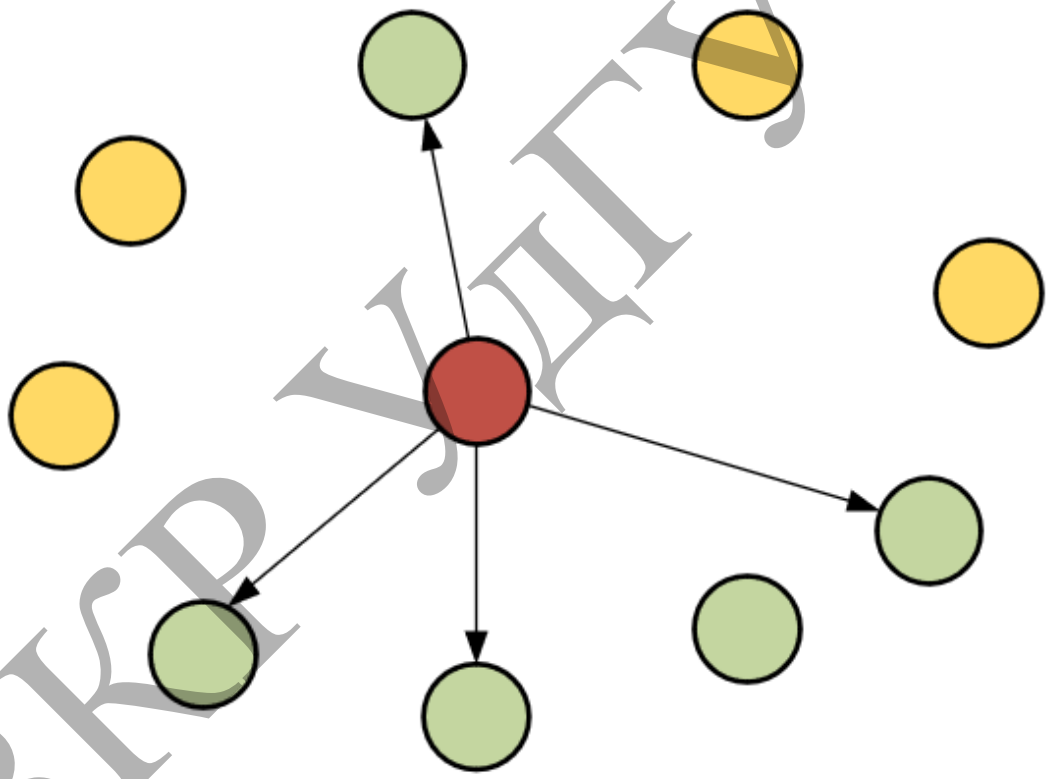


Рисунок 4 – Схема Multicast

ВКР УлГУ

Broadcast – широкое вещание. Информацию получают все участники сети. Позволяет эффективно распространять информацию между всем участникам сети [2]. В IP сетях также расходуется ресурс пропускной способности. На рисунке 5 представлен пример передачи широковещательного сообщения.

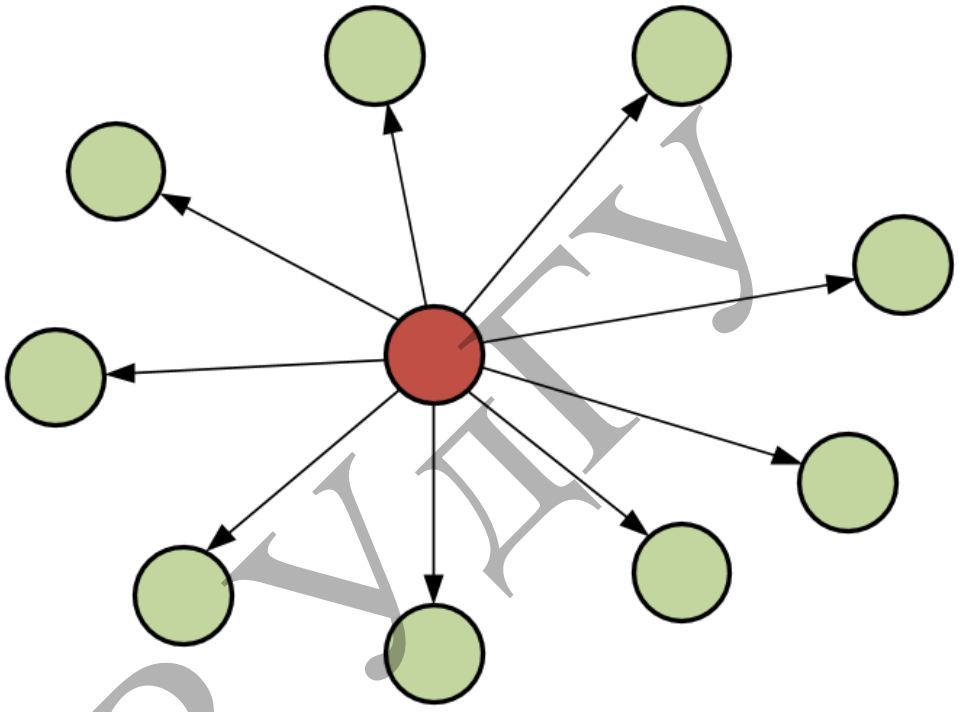


Рисунок 5 – Схема Broadcast

Данные структуры сетей и типы передачи данных справедливы для организации проводных и беспроводных сетей.

ВКР ВлГУ

1.2 Организация радиосети

Дальнейшее описание работы будет идти в контексте организации радиосвязи, поэтому необходимо разобрать основные понятия.

В радиосвязи оперируют символьной скоростью, которая обозначает количество передаваемых символов в единицу времени. Бод (baud) – единица измерения, которая обозначает количество информационного изменения параметров несущей частоты [3]. Выражает полную емкость канала передачи.

Скорость передачи данных зависит от того, сколько символов кодирования (Бод) используется при модуляции. Чем больше возможных символов кодирования, тем больше информации передается за определенное время. На рисунке 6 указан пример кодирования сигнала с использованием 2 символов.

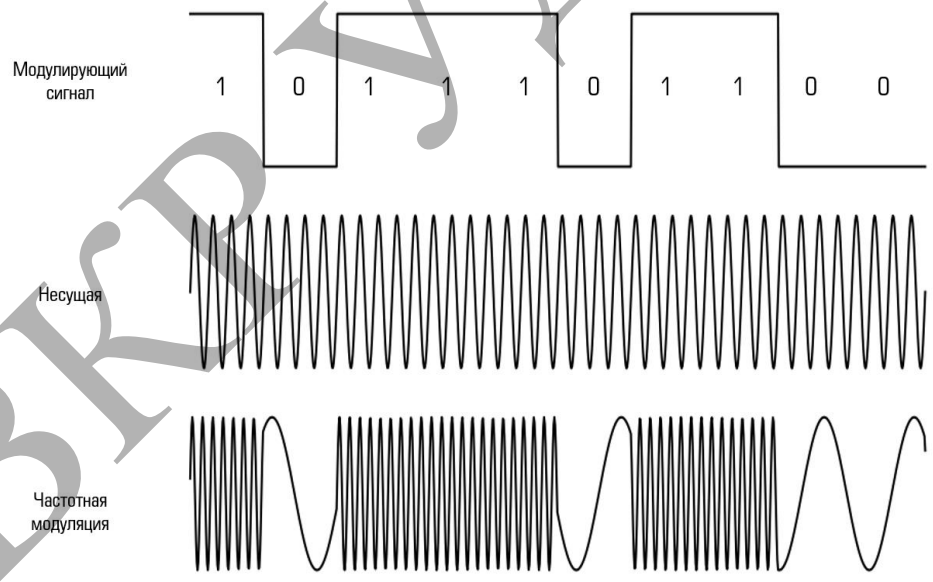


Рисунок 6 – Частотная модуляция дискретного сигнала

С повышением количества используемых символов в модулирующем сигнале снижается помехоустойчивость, потому что различия между символами различаются хуже на фоне шума.

ВКР УлГУ

Теорема Шеннона–Хартли [4] – утверждает, что пропускная способность передачи данных по частотному каналу с гауссовским белым шумом зависит от ширины полосы пропускания и плотности мощности шума. По сути, теорема устанавливает верхний теоретический предел скорости безошибочной передачи информации. Для достижения это предельной скорости полезный сигнал должен быть по статистическим свойствам быть близок к шуму. Ниже представлена формула теоремы для расчета максимальной безошибочной скорости передачи данных в полосе пропускания.

$$\mathrm{C} = \Delta F log_2(1 + \frac{P_s}{P_n}) \quad (1)$$

Где C – пропускная способность канал в бит/с;

ΔF – полоса пропускания канала Гц;

P_s – средняя мощность шума в полосе;

P_n – мощность шума в полосе.

При разработке протокола радиосвязи следует руководствоваться теоретическими пределами используемых каналов связи и использовать их с максимальной эффективностью. Если не учитывать данный факт, то с ростом устройств будет происходить быстрое исчерпание пропускной способности радиоканала.

ВКР УлГУ

1.3 Преимущества и недостатки разных диапазонов частот

Одним из главных параметров радиосвязи является частота работы приемника или передатчика. Первым и основным для всех частот свойством является требование к размерам антенны в зависимости от частоты несущей. С ростом частоты требуемая длинна антенны уменьшается. Второе свойство, это информационная емкость диапазона, которая растет с ростом частоты. На более высоких частотах, относительная ширина полосы пропускания может быть большего размера, что позволяет формировать широкополосные каналы размером в несколько МГц, необходимые для обеспечения высокой скорости передачи данных. В таблице 1 рассмотрены диапазоны частот, их свойства и сфера применения.

ВКР УлГУ

Таблица 1 – Диапазоны частот радиосигнала [5]

Название	**Диапазон частот**	**Длина волны**	**Основное свойство**	**Основные сферы применения**
Очень низкие частоты	3 - 30 КГц	10 – 100 Км	Проникают в воду и под землю.	-Радиосвязь с подводными лодками -Служба точного времени
Низкие частоты	30 - 300 КГц	1 – 10 Км	Огибают земную поверхность.	-Радиовещание и радиосвязь
Средние частоты	0,3 - 3 МГц	0,1 – 1 Км	Дальность связи зависит от многих факторов: состояние атмосферы, сезонность, время суток, солнечная активность.	-Радиовещание и радиосвязь
Высокие частоты	3 - 30 МГц	10 – 100 м	Отражаются от ионосферы.	-Радиовещание и радиосвязь -Загоризонтная радиолокация
Очень высокие частоты	30 - 300 МГц	1 – 10 м	Распространяются в пределах прямой видимости.	-Телевидение -Радиовещание и радиосвязь -Тропосферная связь
Ультравысокие частоты	0,3 - 3 ГГц	0,1 – 1 м		-Телевидение -Радиовещание и радиосвязь -Сотовая связь -Спутниковая навигация -WiFi -Bluetooth
Сверхвысокие частоты	3 – 30 ГГц	1 – 10 см		-Радиолокация -Спутниковое телевещание -Спутниковый интернет -Спутниковая радиосвязь
Крайне высокие частоты	30 – 300 ГГц	0,1 – 10 см		-Спутниковая связь -Радары

ВКР УлГУ

У каждого из представленных диапазонов есть свои преимущества и недостатки. В данной работе рассматривается радиосвязь между устройствами, имеющими размеры в пределах от 0.1 до 10 метров. Это накладывает ограничения на использование диапазонов частот, так как минимальный размер эффективной антенны превышает заданные размеры, поэтому сразу можно исключить из рассмотрения диапазон от 3 КГц до 3 МГц. Рассмотрим преимущества и недостатки разных диапазонов частот в контексте использования в беспилотных средствах (Таблица 2).

Таблица 2 – Преимущества и недостатки диапазонов частот в контексте связи беспилотных устройств [5]

Название	**Диапазон частот**	**Преимущества**	**Недостатки**
Высокие частоты	3 - 30 МГц	-Возможность использования нижней части диапазона для ионосферной связи в ночное время. Это позволяет организовать связь на несколько тысяч километров используя маломощный передатчик.	-Для приема и передачи сигнала необходимы антенны больших размеров. -Очень низкая скорость передачи данных. -Высокий уровень атмосферных и индустриальных помех.
Очень высокие частоты	30 - 300 МГц	-Хорошее огибание препятствий.	-Низкая скорость передачи данных.
Ультравысокие частоты	0,3 - 3 ГГц	-Низкий уровень естественного шума в диапазоне.	-Дальность связи в пределах видимости.
Сверхвысокие частоты	3 – 30 ГГц	-Высокая скорость передачи данных.	
Крайне высокие частоты	30 – 300 ГГц	-Очень высокая скорость передачи данных. -Сложность перехвата сигнала из-за сильной направленности сигнала.	-Дальность связи в пределах видимости. -Сигнал имеет сильное затухание в атмосфере.

С повышением частоты требуемый размер антенны уменьшается. Из этого следует, что беспилотные устройства больших размеров имеют возможность принимать и передавать сигналы в большем диапазоне частот и более эффективно. Также радиосигнал имеет свойство увеличивать свою

ВКР УлГУ

направленность с повышением частоты. Это свойство позволяет повысить устойчивость к перехвату сигнала.

ВКР УДТУ

1.4 Основные виды модуляции и мультиплексирования

Для передачи сигнала на выбранной несущей частоте необходимо провести его модуляцию. Рассмотрим основные виды модуляции, их преимущества и недостатки.

АМ – амплитудная модуляция. Изменяет амплитуду сигнала. Из основных преимуществ можно выделить простоту реализации и малую занимаемую полосу частот [6]. Недостатками являются низкая энергетическая эффективность использования энергии передачи и плохая помехоустойчивость. Любые амплитудные помехи искажают сигнал. На рисунке 7 указан пример амплитудной модуляции сигнала.

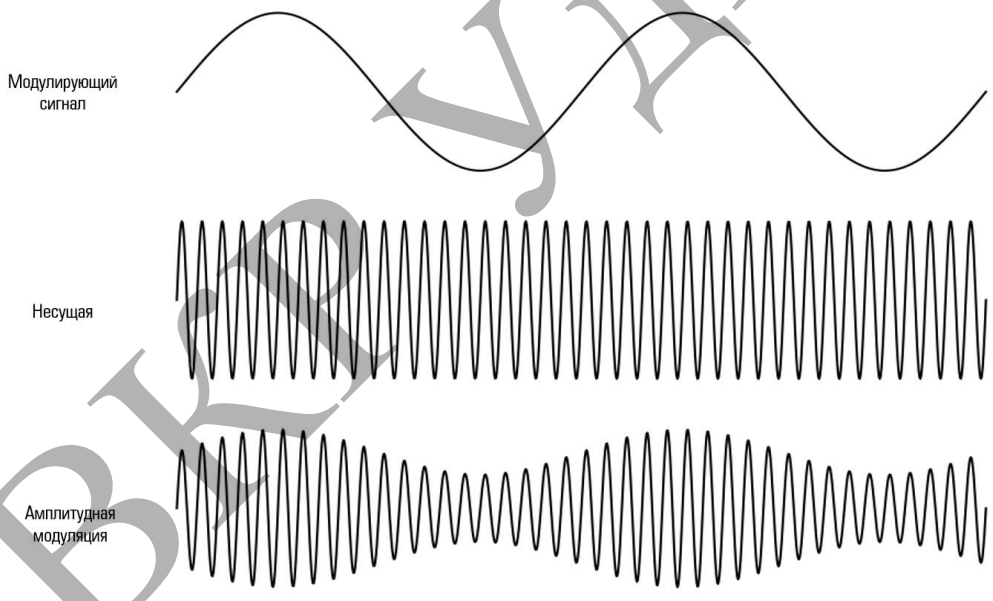


Рисунок 7 – Амплитудная модуляция

ВКР УлГУ

ЧМ – частотная модуляция. Изменяет частоту сигнала. Главным преимуществом является высокая помехоустойчивость [7]. Шум радиоэфира является в основном амплитудным и приемнику легче выделить полезный сигнал, потому что информации содержится в частоте сигнала. Недостатками является более сложная реализация чем АМ и более широкая занимаемая полоса частот. На рисунке 8 указан пример частотной модуляции сигнала.

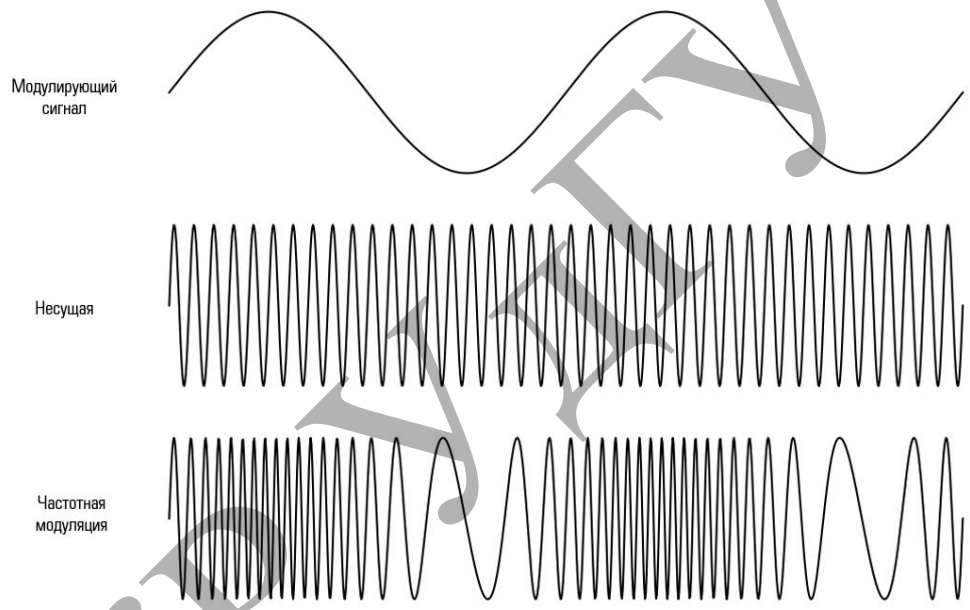


Рисунок 8 – Частотная модуляция

ВКР.УЛТУ

ФМ – фазовая модуляция. Изменяет фазу сигнала несущей частот. В основном используют цифровую фазовую модуляцию, когда модулирующий сигнал имеет определенные дискретные уровни [8]. На рисунке 9 указан пример фазовой модуляции сигнала.

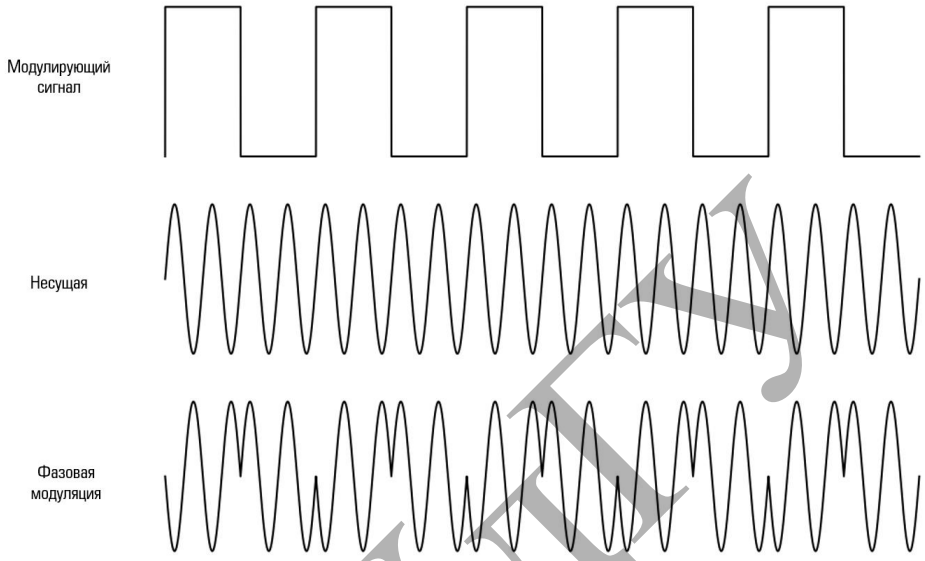


Рисунок 9 – Фазовая модуляция

Данные виды можно совмещать между собой и получать модуляцию под необходимые нужды, в основном объединяют АМ и ФМ для увеличения количества передаваемых бит за один символ, используя объединение параметра фазы и амплитуды.

В радиосвязи, как и в проводных сетях, существует понятие мультиплексирование. Мультиплексирование – это уплотнение канала связи с помощью его разделение на отдельные потоки [9]. То есть мы можем разделить канал связи на подканалы по определенному принципу. Подканалы будут делить пропускную способность всего канала в целом. Рассмотрим основные виды мультиплексирования. На рисунке 10 указаны основные типы мультиплексирования.

ВКР УлГУ

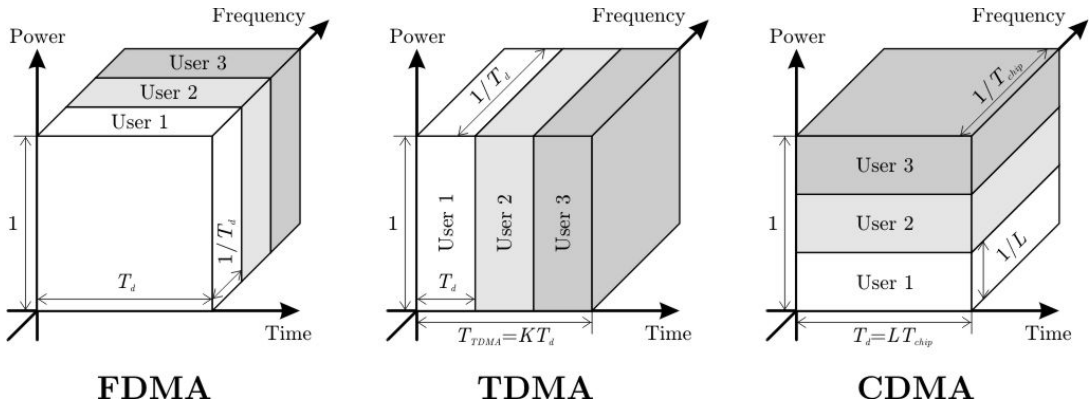


Рисунок 10 – Представление разных видов мультиплексирования с помощью осей

FDMA (Frequency Division Multiple Access) – Множественный доступ с частотным разделением. Происходит разделения частотного диапазона на несколько каналов. На один канал может вещать только одно устройство [10].

TDMA (Time Division Multiple Access) – Множественный доступ с временным разделением. Канал связи разделяется по времени. На одной частоте может вещать в один момент только одно устройство [10].

CDMA (Code Division Multiple Access) – Множественный доступ с кодовым разделением. Полоса пропускания является общей для всех устройств. Устройство может вещать в любой момент времени. Разделение сигнала происходит по кодовым последовательностям [10].

Как и с модуляцией данные виды мультиплексирования можно объединять между собой. Объединения которые встречаются чаще всего:

FDMA + TDMA. В данном случае полоса частот делится на отдельные частотные каналы, а каждый частотный канал уже делится по времени.

FDMA + CDMA. Вся доступная полоса частот разделяется на несколько широкополосных несущих, в каждой из которых происходит множественный доступ с кодовым разделением.

ВКР УлГУ

1.5 Типы шифрования и сокрытия сигнала

В радиосвязи важно обеспечить защиту передаваемых данных. Для этого используют алгоритмы шифрования. В основном используют стандарт шифрования AES (Advanced Encryption Standard). AES – симметричный алгоритм блочного шифрования. Используется один ключ для зашифровки и расшифровки [11].

Так же важным является возможность сокрытия сигнала, для уменьшения вероятности его перехвата. Основная идея сокрытия заключается в растворении сигнала в радиошуме. Для этого используют расширения спектра сигнала. Рассмотрим основные методы. На рисунке 11 указаны спектры мощности для разных видов расширения спектра.

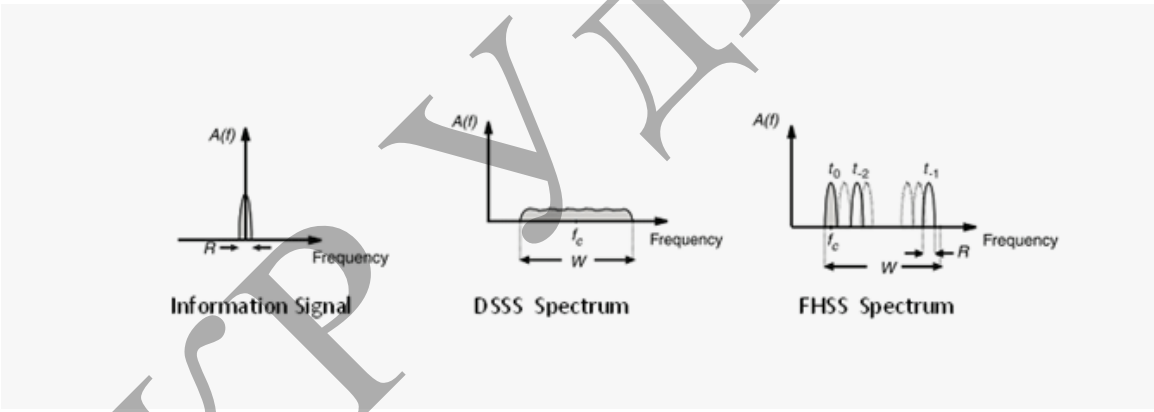


Рисунок 11 – Спектр мощности сигнала во времени для DSSS и FHSS

DSSS (Direct sequence spread spectrum) – прямое расширение спектра. Информационный модулирующий сигнал умножается на псевдослучайную последовательность с высокой скоростью, тем самым повышая модулирующую частоту. Происходит искусственное расширение спектра [12]. Без знания последовательности различение сигнала среди шума становится затруднительным. Снижается вероятность перехвата сигнала.

FHSS (Frequency-hopping spread spectrum) – псевдослучайная перестройка рабочей частоты. Метод заключается в быстрой перестройке

ВКР УлГУ

несущей частоты [12]. Спектр также расширяется и сигнал становится менее заметным на фоне шума.

Совмещение шифрования и сокрытия сигнала позволяет усложнить перехват и расшифровку сигнала, тем самым обеспечить безопасность канала связи.

ВКР УлГУ

1.6 Протоколы беспроводной децентрализованной связи

Значительная часть существующих протоколов проводной и беспроводной связи, поддержана комитетом IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Рассмотрим те из них, которые обеспечивают беспроводную связь и возможность децентрализации.

Существует два основных режима работы децентрализованной беспроводной сети Ad Hoc и Mesh. Данные режимы поддерживают такие технологии как: Bluetooth (IEEE 802.15.1), Wi-Fi (IEEE 802.11), ZigBee (802.15.4) [13].

Ad Hoc – режим работы децентрализованной сети, которая создается в режиме реального времени. Узлы равноправны, отсутствует иерархия. Применяется для спонтанных сетей без инфраструктуры [14]. В таблице 3 рассмотрены преимущества и недостатки Ad Hoc сетей.

Таблица 3 – Преимущества и недостатки Ad Hoc сетей

Преимущества	**Недостатки**
-Независимость от внешней инфраструктуры. Для организации сети не требуется наличие наземных станций.	-Эффективность сети резко падает с ростом числа устройств. Возникают коллизии в радиоэфире.
-Максимальная простота протокола если не использовать ретрансляцию.	-Размер сети ограничен максимальной дальностью связи между двумя устройствами.
-Минимальная задержка передачи данных. Данные передаются напрямую.	
-Быстрая организация сети. Хорошо подходит для создания соединения между подвижными объектами.	

ВКР ЧГУ

Mesh – децентрализованная ячеистая беспроводная сеть. Сеть может иметь иерархию, либо все участники сети могут быть равноправными. Используется для заранее продуманной инфраструктуры [15]. В таблице 4 рассмотрены преимуществ и недостатки Mesh сетей.

Таблица 4 – Преимущества и недостатки Mesh сетей

Преимущества	**Недостатки**
-Независимость от внешней инфраструктуры. Для организации сети не требуется наличие наземных станций.	-Рост служебных данных с ростом количества устройств. В итоге происходит замедление работы сети.
-Автоматическое восстановление сети при сбое одного из участников.	-Сложность протокола.
-Значительное увеличение дальности. Возможность выстраивать сети протяженностью в десятки километров.	-Высокое энергопотребление для Wi-Fi Mesh.
-Масштабируется легче чем Ad Hoc.	-Для обеспечения высокой скорости передачи данных требуется высокопроизводительный процессор.
	-Увеличение задержек при переадресации данных.

Изначально при создании протоколов Mesh-сетей не предполагалась возможность их использования в беспилотниках. Изначальная цель была в создании механизма оперативной организации отказоустойчивой сети. Когда появилась необходимость в организации сети между беспилотными устройствами, протоколы Mesh лучше всего подходили для достижения цели.

Почему выбрали именно Mesh? Потому что там уже реализованы механизмы самоорганизации, ретрансляции, восстановления и возможностей протокола хватало на ранних этапах развития беспилотных систем. Но в данный момент времени технология приобретает массовый характер и Mesh уже с трудом обеспечивает текущие требования к организации сети. Так же необходимо учитывать вопрос безопасности и устойчивости к радио-атакам, в контексте использования в беспилотных устройствах она является низкой [16].

На практике максимальное количество устройств без оптимизации протокола не сможет превысить несколько десятков. Таким образом

ВКР УлГУ

необходимо отметить, что протоколы Mesh используют ресурс радиоэфира неэффективно.

ВКР УлГУ

1.7 Постановка задачи

Рассмотренные преимущества и недостатки используемых протоколов децентрализованной сети позволяют сделать вывод о необходимости создания специализированного протокола связи между беспилотными устройствами.

Главным преимуществом радиосвязи в отличии от проводной и оптоволоконной является возможность передачи широковещательного сообщения без ограничения на количество приемников. Данную особенность необходимо применять для организации сети. В этой связи, отметим основные требования к разработке протокола децентрализованной сети.

Необходимо разработать протокол, который позволит создавать устойчивую децентрализованную сеть. В контексте беспилотных систем важно обеспечить надежность связи и самоорганизации. Радиоэфир должен использоваться с максимальной эффективностью.

В процессе работы над выпускной квалификационной работой были рассмотрены существующие протоколы проводных и беспроводных сетей. Интересным показался устаревший протокол IEEE 802.5 Token Ring 1989 года [17], который основан на идее передачи маркера по сети от устройства к устройству. Данный протокол предназначен для объединения компьютеров в локальную сеть по кабелю.

Маркер по очереди передается каждому участнику по сети, которая логически объединена топологией кольцо. На время владение маркером устройство получает право передавать пакет данных по сети. Это позволяет работать сети без коллизий. На рисунке 12 представлена схема сети.

ВКР УлГУ

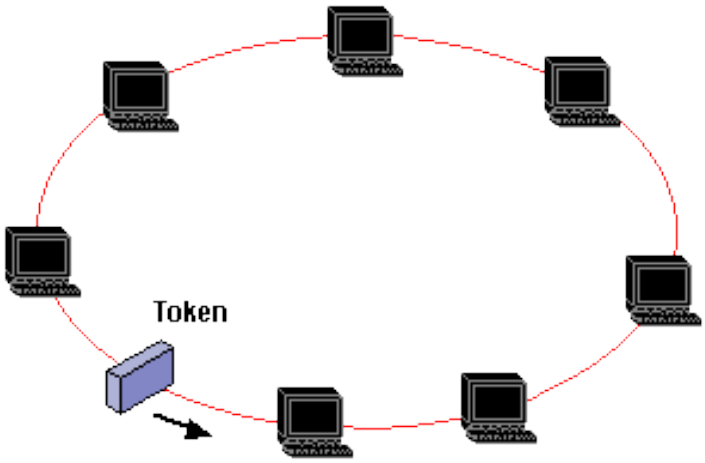


Рисунок 12 – Структура сети Token Ring

В данной идее интересным является сам принцип разделения одного физического канала передачи данных на всех участников. Принцип можно перенести на радиосвязь, где уже вместо кабеля будет выделенная полоса частот.

В итоге можно выделить основные требования к разрабатываемому протоколу децентрализованной сети:

– Эффективное использования радио ресурса;

– Поддержание способности к самоорганизации;

– Возможность самовосстановления;

– Возможность быстрой перестройки топологии;

– Масштабируемость.

Взяв за основу протокол Token Ring на основе передачи маркера между устройствами и учитывая свойства радиосвязи был разработан оригинальный протокол, представленный в данной работе.

ВКР УлГУ

2 Разработка протокола

2.1 Протокол. Общий принцип работы и назначение

Основной идеей протокола является соединение узлов топологией цепь. Цепь является разомкнутой. Участники сети пересылают друг другу определенный пакет данных по очереди.

Формат данных представляет из себя пакет, в котором записаны все участники сети, их местоположение и очередь сообщений или команд. В отличие от протокола 802.5 Token Ring, пакет данных в себе уже несет полезную нагрузку, а топология сети является разомкнутой. На рисунке 13 указана топология и схема работы сети.

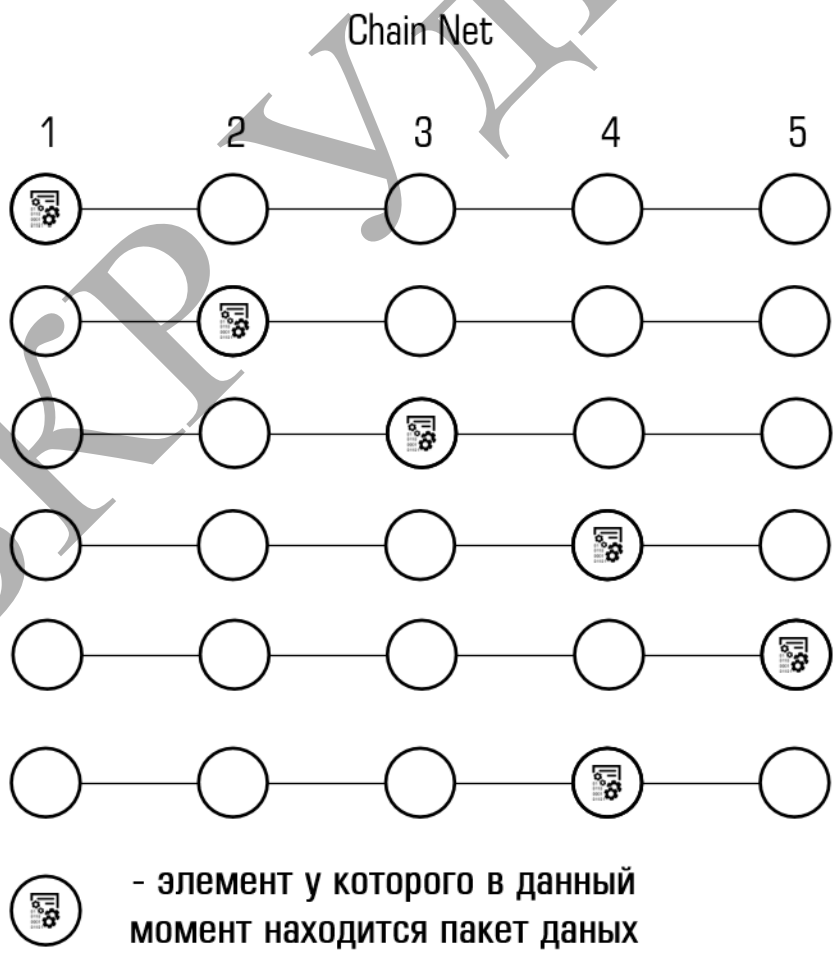


Рисунок 13 – Схема работы сети в динамике

ВГУАПУ

Полный цикл передачи пакета по узлам: **1**=>**2**=>**3**=>**4**=>**5**=>**4**=>**3**=>**2**=>**1**. Передача происходит по радиоканалу в одной полосе по очереди. Из этого следует, что группа устройств занимает всего один канал радиоспектра. Это позволяет расположить большое количество устройств в пределах одной локации и избежать коллизий. Допустим есть полоса пропускания шириной в 1 МГц. Разделим ее на 20 каналов по 50 КГц. На каждый канал подключается от 2 до 10 устройств.

Преимуществом топологии цепь является простота ее реорганизации. При ухудшении связи между узлами, можно изменить последовательность связи между устройствами не останавливая процесс работы. Уровень и качество сигнала передаваемого пакета данных сможет оценивать каждый участник сети, потому что все прослушивают один канал. Это дает возможность оптимизировать топологию не останавливая работу.

На рисунке 14 представлена структура рабочего пакета данных.

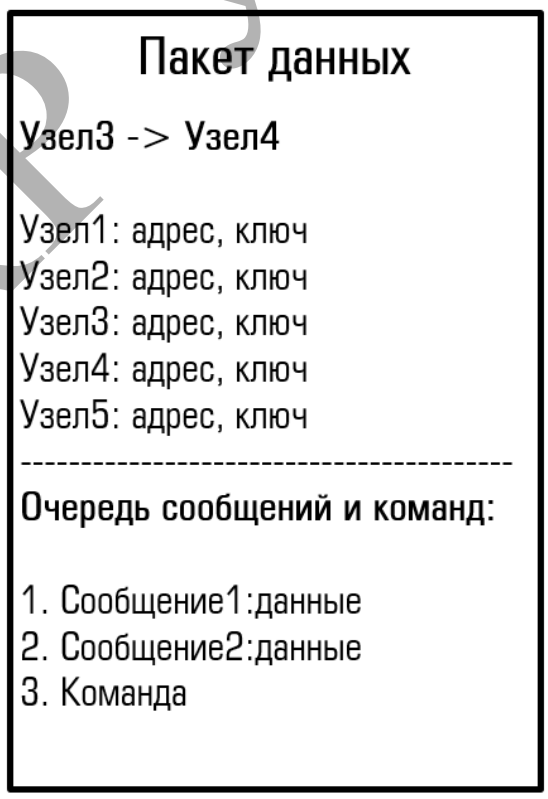


Рисунок 14 – Лист данных для работы сети

ВКР УлГУ

В очереди содержатся сообщения и команды. Получив сообщение или команду устройство редактирует пакет данных, выставляет отметку о прочтении. Когда все устройства выставили отметку, сообщение удаляется из пакета. Каждое устройство сети имеет право добавить сообщение или команду в очередь.

Данный механизм не предназначен для передачи данных большого объема, к которым относятся видео, фотографии или звук. Предполагается его использование для передачи координат, сообщений, команд или метаинформации.

Для передачи данных большого объема данный протокол будет выступать в качестве организатора передачи данных и синхронизации. Данные будут передаваться по каналам связи на других частотах, которые имеют большую пропускную способность.

ВКР УДГУ

2.1.1 Создание сети

Для создания сети необходимо, чтобы устройство в случае отсутствия в радиоэфире сообщений, периодически производило отправку пакета сообщающее о его существовании. В случае получения ответа на свой пакет устройство становится ведущим и начинает процесс создания сети как указанно на рисунке 15.

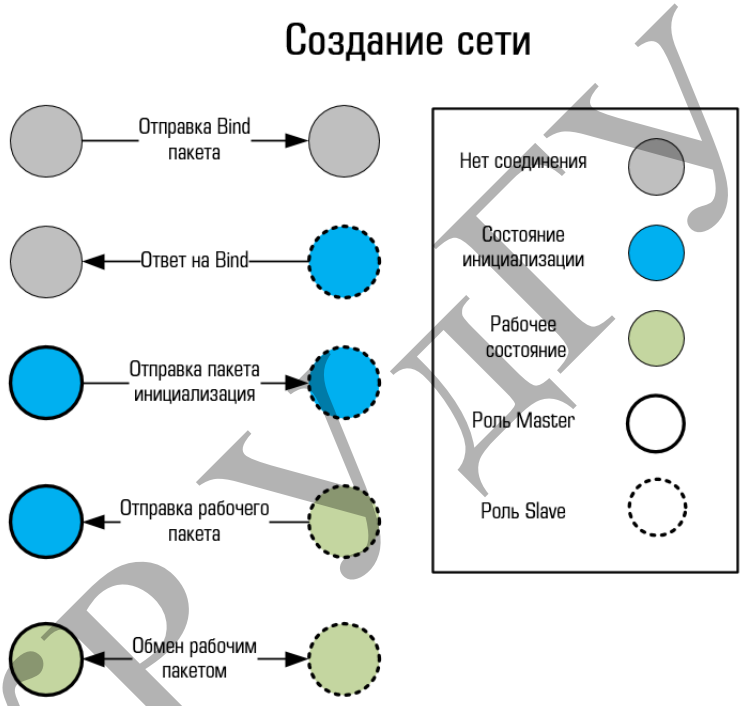


Рисунок 15 – Процесс создания группы

Далее ведущее устройство отправляет пакет инициализации сети новому устройству. Ведомое устройство отвечает на пакет и отвечает на него уже рабочим пакетом. Сеть переходит в рабочий режим.

ВКР ИГУ

2.1.2 Добавление участника в группу

Для обеспечения механизма добавления нового участника будет использоваться соседний канал связи, чтобы не останавливать работу существующей группы. Ниже представлен рисунок 16 с процессом добавления нового устройства в группу.

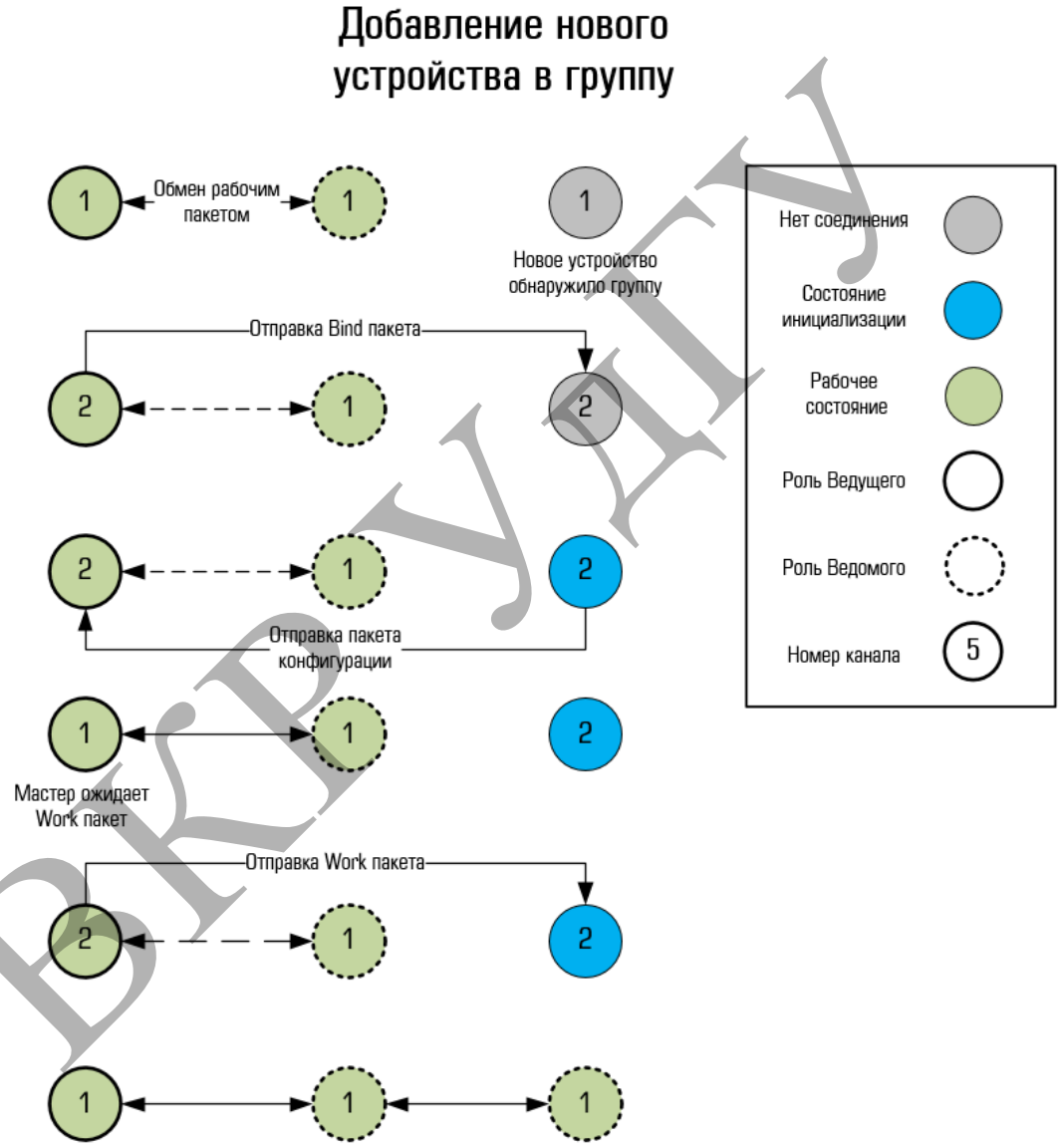


Рисунок 16 – Присоединение нового участника

Добавления участника происходит через соседний канал связи. У группы всегда есть ведущий элемент, который после отправки сообщения по цепочке дальше сразу посылает пригласительный пакет на соседний канал.

ВКРУАТУ

Новое устройство, которое увидит на основном канале связи активность, переключается на соседний канал и ждет пригласительный пакет от ведущего группы. Ведущий группы после отправки пригласительного пакета остается его прослушивать некоторое время. Новое устройство сразу отправляет ответ на пригласительный пакет. После ведущий пересылает рабочий пакет новому устройству.

Далее уже ведомое устройство числится в группе и имеет у себя рабочий пакет. Переключается на основной канал и передает пакет дальнейшему получателю.

ВКР УлГУ

2.1.3 Масштабирование системы

Размер группы в протоколе является ограниченным, поэтому необходимо организовать связь между группами, работающими на разных каналах. На рисунке 17 представлена структура сети.

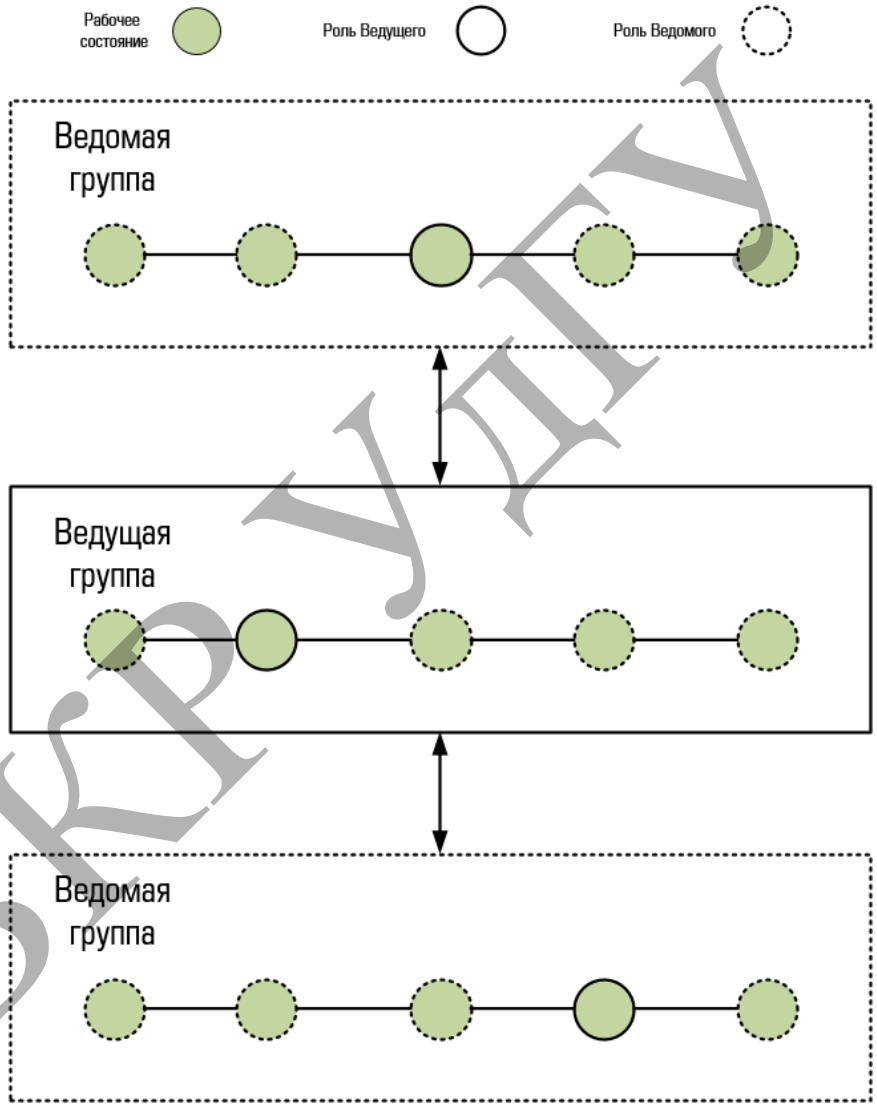


Рисунок 17 – Схема сети

Для масштабирования системы нужно выделить мастер группу, которая будет управлять новой сетью, состоящей из групп. Для обеспечения масштабирования ведущие устройства групп должны иметь возможность

ВКР УдГУ

работы одновременно на двух каналах. Принцип взаимодействия групп между собой повторяет взаимодействие внутри отдельной группы.

ВКР УдГУ

2.1.4 Механизмы восстановления и реорганизации сети

Рассмотрим несколько сценариев разрыва сети и дальнейший алгоритм действий при их возникновении.

В децентрализованной системе возможен разрыв сети. Например, разрыв происходит посередине (рисунок 18). Когда настанет момент передачи пакета от узла 3 к узлу 2, то узел 3 не получит пакет обратно для передачи узлу 4. Поэтому принимается решение узлам 3, 4, 5 перейти на другой канал для того, чтобы избежать коллизий и создать новую группу. То же самое сделают узлы 1 и 2, так как они не получали пакет данных определенное время. В итоге после разрыва образуются две группы, которые впоследствии могут обратно объединиться.

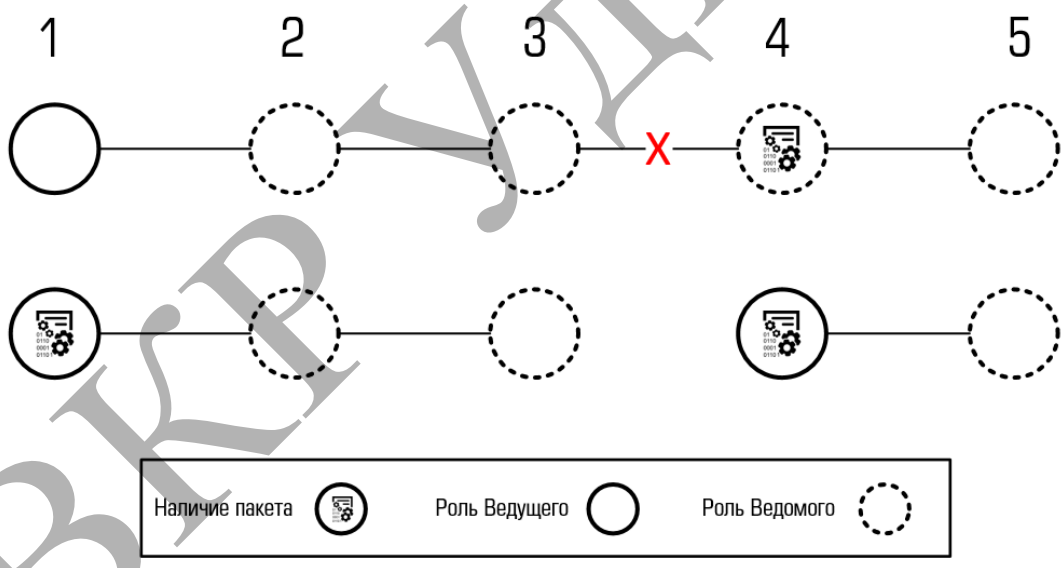


Рисунок 18 – Потеря сигнала между устройствами

ВКР УдГУ

При выходе ведущего из строя происходит выбор нового (Рисунок 19). Приоритетным устройством на роль ведущего будет ближайшее устройство к мастеру.

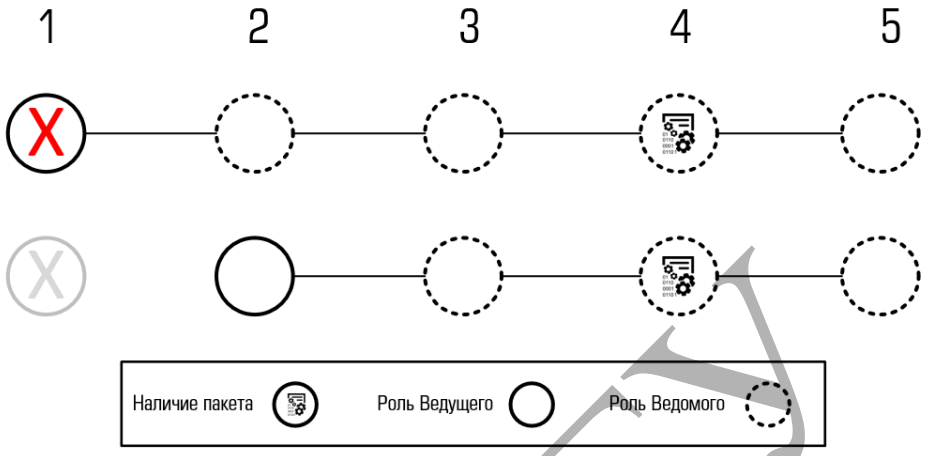


Рисунок 19 – Выход ведущего из строя

При выходе из строя ведомого происходит его удаления из пакета данных. Новая группа меняет топологию и продолжает работу как указанно на рисунке 20.

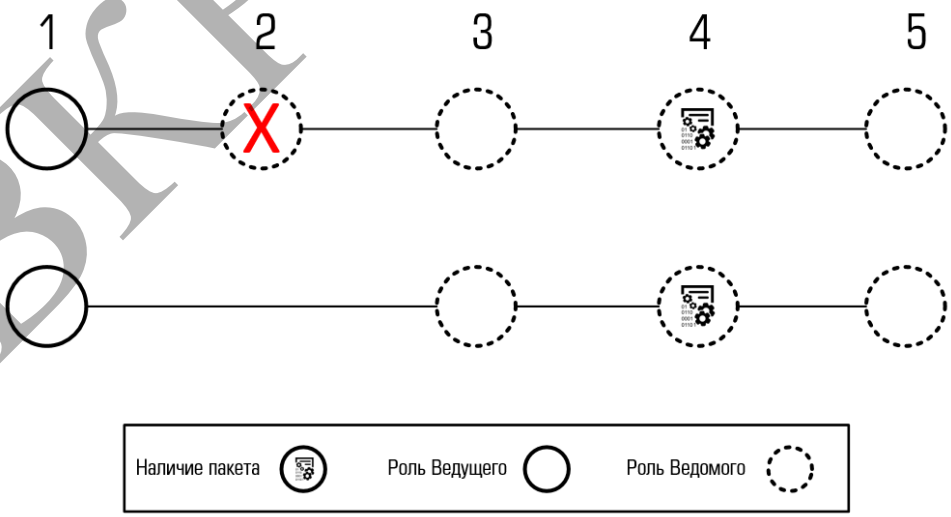


Рисунок 20 – Выход ведомого из строя

ВКР УлГУ

2.1.5 Использование технологии BitTorrent

Для обеспечения передачи данных большого объема, к примеру фото или видео, будут использоваться каналы связи с большей пропускной способностью. Исходя из этого возникает вопрос организации эффективной передачи данных между устройствами. Для этих целей хорошо подходит существующий протокол одноранговой сети BitTorrent.

BitTorrent – это пиринговый одноранговый сетевой протокол для обмена файлами. Позволяет передавать файлы частями между участниками сети и обеспечить избыточность данных. Этот протокол является децентрализованным и регулирует передачу файлов напрямую от участника к участнику. Позволяет снизить нагрузку и зависимость от каждого клиента источниках [18]. На рисунке 21 представлен пример строения сети BitTorrent.

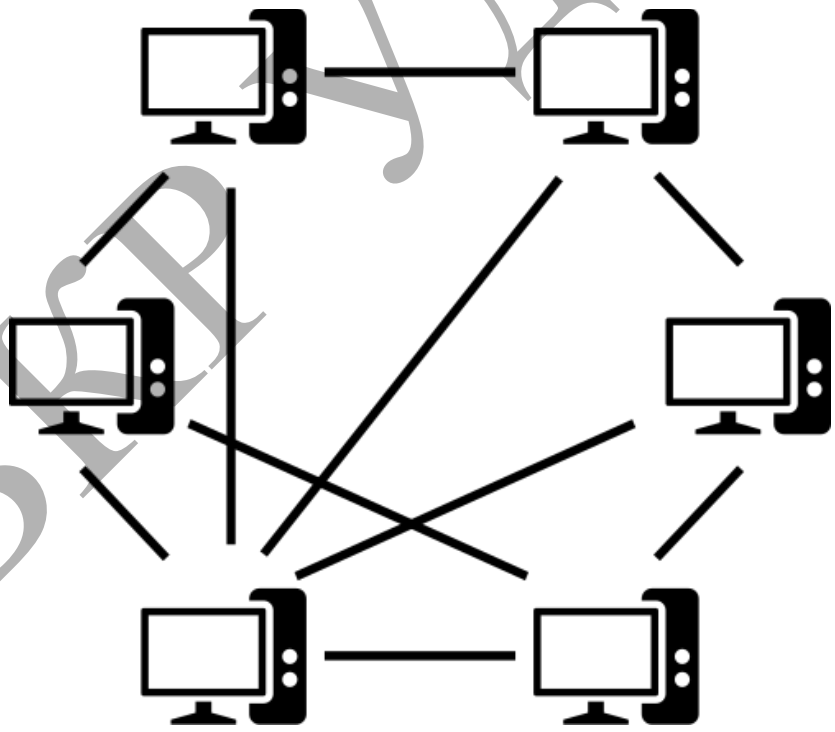


Рисунок 21 – Пример строение пиринговой одноранговой сети

Используя данную технологию в контексте распределения данных между беспилотными устройствами, можно добиться высокой эффективности и скорости распространения данных. Классический подход с созданием

ВКР УлГУ

одного источника данных для всех участников будет явно неэффективным, потому что передача данных будет происходить последовательно.

В перспективе можно оптимизировать данный протокол под беспроводную передачу данных добавив широковещательную рассылку и регулировку мощности передатчика для того, чтобы избежать коллизий с другими группами на расстоянии.

ВКР УлГУ

2.2 Потенциальные преимущества и недостатки использования протокола

Потенциальные преимущества протокола:

–Экономия ресурса радиоэфира и простое распределение участников сети;

–Возможность динамически менять топологию;

–Возможность создания технической реализации протокола, используя существующие трансиверы;

–Использование TDMA (Множественный доступ с разделением по времени). Можно использовать полудуплексные трансиверы;

–Простая основная идея. Каждое устройство имеет основную задачу передавать пакет данных. Из доступных действий только подключение к группе, добавление сообщений и прослушивание эфира.

Недостатки:

–Чем больше размер группы, тем больше времени требуется для обхода пакета между участниками. Данный недостаток решается масштабированием с помощью создания новых групп;

–Для эффективной реализации необходимо создавать специализированное устройство, работа которого будет оптимизирована с физического уровня.

ВКР УлГУ

3 Реализация работы протокола

3.1 Выбор компонентов

Для реализации работы протокола используем модуль трансивера CC1101 и микроконтроллер ESP32C3. Соберем их в количестве 3 штук. В устройстве будет использоваться литий ионный аккумулятор формата 18650. Для зарядки аккумулятора и получения источника напряжения 5 В, был выбран модуль зарядки повербанка. Добавим светодиоды зеленого и красного цвета для индикации. Также добавим в схему двухпозиционный переключатель.

Модуль CC1101 это радиочастотный трансивер частот ISM (Industrial, Scientific, Medical) диапазона (Рисунок 22). Поддерживает работу на частотах 315, 433, 868, 915 МГц. Интерфейс связи SPI. Максимальная скорость передачи данных до 600 Кбит/с. Поддерживаемые типы модуляции: OOK, ASK, 2-FSK, 4-FSK, GFSK, MSK [19].



Рисунок 22 – Модуль CC1101

ВКР УлГУ

Производительности микроконтроллера ESP32C3 (Рисунок 23) достаточно для разработки протокола. ESP32C3 имеет 32 битный процессор RISC-V частотой 160 МГц. Размер памяти для программы 4 Мб [20]. Есть наличие интерфейса SPI для подключения модуля CC1101.

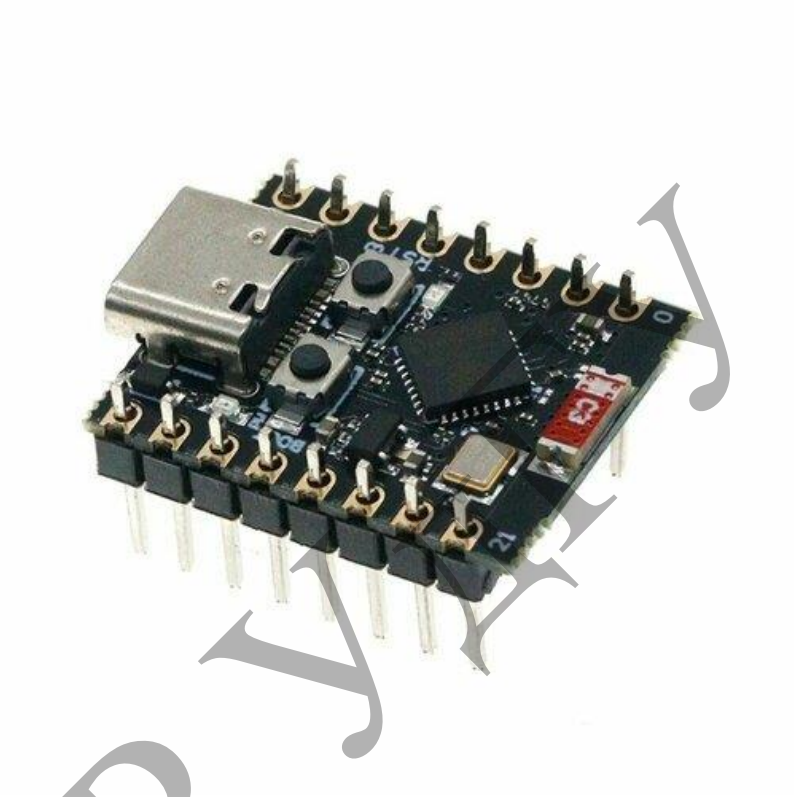


Рисунок 23 – Микроконтроллер ESP32C3

Данные компоненты были выбраны исходя из их доступности и наличия готовых библиотек для реализации устройства.

ВКР УлГТУ

3.2 Схема соединения компонентов

Взаимодействие с трансивером CC1101 происходит с помощью интерфейса SPI. Питание компонентов поступает с платы модуля повербанка. Также в схеме присутствует выключатель. На рисунках 24 и 25 представлены названия выводов микроконтроллера ESP32C3 и трансивера CC1101.

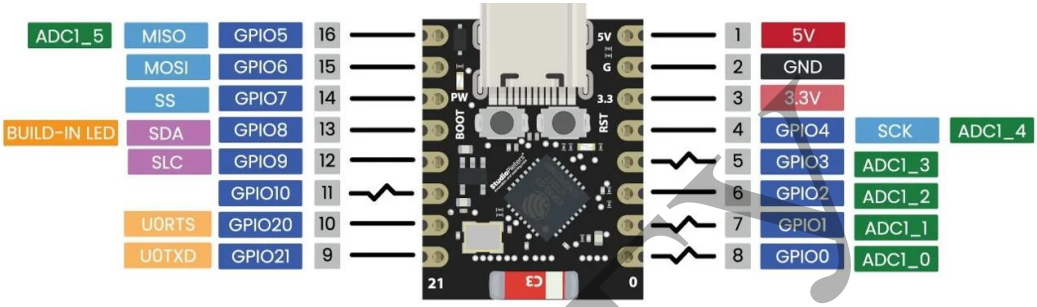


Рисунок 24 – Выводы микроконтроллера ESP32C3

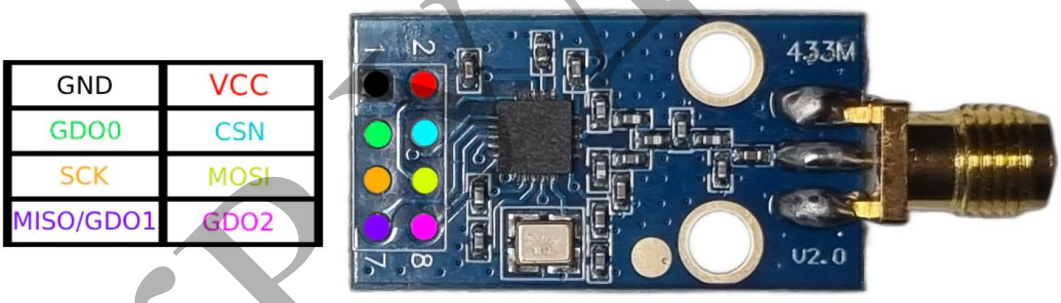


Рисунок 25 – Выводы трансивера CC1101

ВКР ТУСУР

На рисунке 26 представлена схема подключения компонентов. По SPI интерфейсу подключаем микроконтроллер к трансиверу и подводим питание модулей через выключатель.

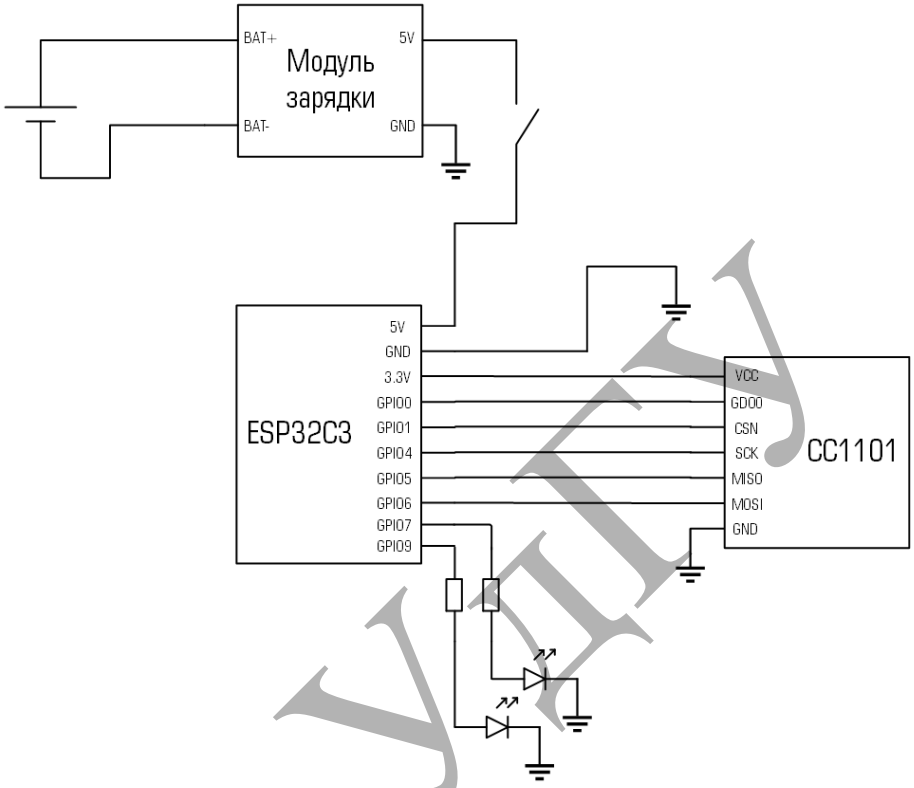


Рисунок 26 – Схема устройства

Назначение выводов микроконтроллера:

1) GPIO0 – GDO0 вывод прерывания;

2) GPIO1 – CSN вывод выбора устройства SPI;

3) GPIO4 – SCK сигнал синхронизации;

4) GPIO5 – MISO сигнал от ведомого к ведущему;

5) GPIO6 – MOSI сигнал от ведущего к ведомому;

6) GPIO7 – Вывод на зеленый светодиод;

7) GPIO9 – Вывод на красный светодиод.

ВКР УлГУ

3.3 Принцип работы технического решения

Разработка прошивки для ESP32C3 велась на языке C. В работе протокола использовалась библиотека FreeRTOS для разделения работы на отдельные потоки. Всего предусмотрены три потока: RX_TASK для обработки принятых пакетов, TX_TASK основной поток работы протокола и SERIAL_TASK для обработки команд, поступающих с компьютера.

Параметры работы CC1101:

–Частота 433 МГц;

–Модуляция GFSK;

–Ширина канала 200 КГц;

–Скорость передачи данных 38,4 Кб/с.

В данной реализации есть ограничение, которое возникает из-за того, что трансивер является полудуплексным и в один момент времени может прослушивать только один канал. Учтем это при разработке алгоритма.

В основе работы протокола используется реализация конечного автомата. Трансивер основное время находится в состоянии приема пакета. Микроконтроллер постоянно проверяет наличие сообщения в очереди трансивера и в случае наличия выгружает по SPI. После выгрузки происходит обработка пакета и расположение в памяти по его типу.

Для работы протокола было создано три типа пакета:

Bind – пакет, предназначенный для создания сети мастером или приглашения нового устройства в сеть.

Conf – пакет конфигурации. Предназначен для инициализации сети с последующим переходом в рабочий режим.

Work – рабочий пакет, который уже содержит в себе участников сети.

ВКР УлГУ

На рисунке 27 представлена схема конечного автомата. Рассмотрим каждое состояние протокола.

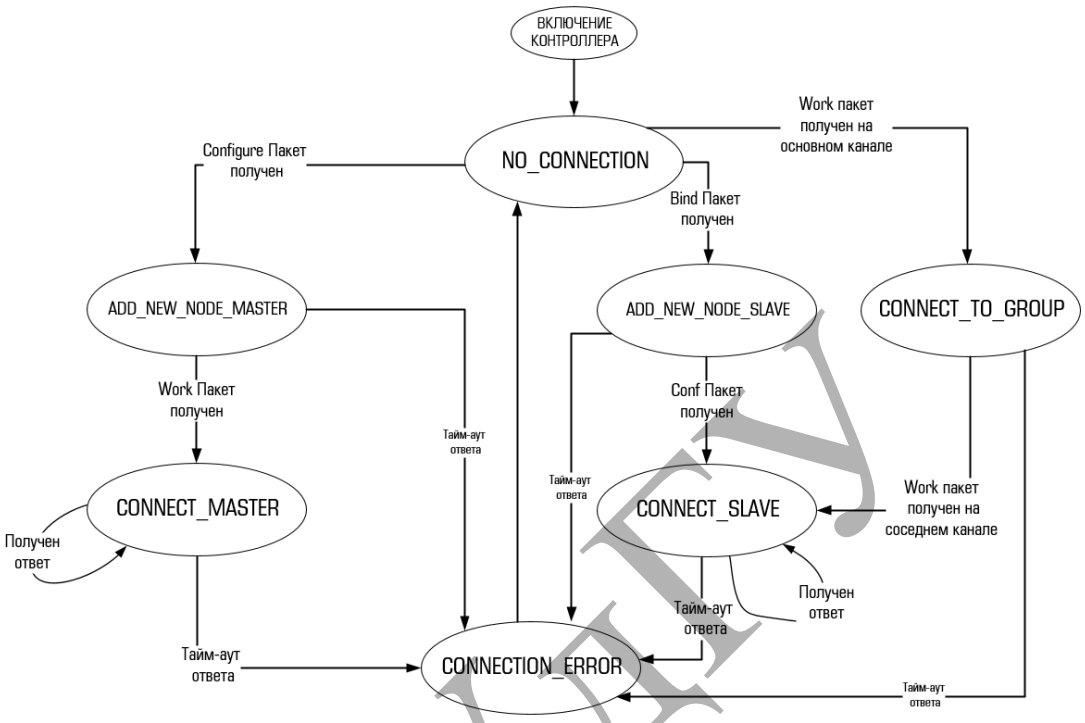


Рисунок 27 – Конечный автомат работы протокола

NO_CONNECTION – начальное состояние устройства. В нем происходит отправка Bind пакета и обработка принятых пакетов. Bind пакет отправляется со случайной задержкой для того чтобы избежать одновременной отправки пакета с двух разных устройств.

ADD_NEW_NODE_MASTER и ADD_NEW_NODE_SLAVE – состояния в которых происходит процесс создания сети. Используется только в случае создания сети с нуля. В зависимости от того, кто отправил и кто принял Bind пакет, происходит переход в другое состояние. Устройство принявшее пакет будет являться ведомым.

CONNECT_MASTER и CONNECT_SLAVE – основное рабочее состояние. Различия заключаются в отсутствие прав на изменение участников пакета ведомым. Ведущий в рабочем состоянии так же отправляет

ВКРУАТУ

пригласительный пакет на соседний канал во время работы и некоторое время ждет ответа.

CONNECT_TO_GROUP – состояния для добавления нового устройства в группу. Устройство переходит на соседний канал и ждет пригласительный пакет от ведущего группы. При получении отвечает на него пакетом Conf. Далее ведущий группы высылает Work пакет где уже добавлено новое устройство. Новый ведомый переходит на основной канал и группа дальше продолжает работу и последовательную передачу пакета.

CONNECTION_ERROR – состояние ошибки. В данном состоянии происходит сброс всех данных устройства с последующим переходом в состояние NO_CONNECTION.

ВКР УлГУ

Для обеспечения работы состояний была создана структура для управления ProtocolCtrl указанная на рисунке 28. В основном цикле протокола происходит постоянный расчет таймаутов и переход в текущее состояние. Состояния реализованы функциями, функция всегда возвращает указатель на функцию. На рисунке 29 указан основной цикл работы протокола. С помощью данного механизма происходит переход между состояниями.

```
typedef struct {
    void* (*_state_func)(void);
    bool state_init_flag;
    unsigned char this_id; // 0 is no id
    unsigned char current_group; // 0 is no group
    uint8_t current_node_count;
    unsigned char current_channel;
    unsigned char node_id_list[SW_MAX_NODE_COUNT];
    bool direction_send;
    bool my_turn_send_work_packet;
    //ignore rx
    bool ignore_bind_rx;
    bool ignore_conf_rx;
    bool ignore_work_rx;
    //channel filter rx 0xFF no filter
    unsigned char filter_bind_rx_channel;
    unsigned char filter_conf_rx_channel;
    unsigned char filter_work_rx_channel;
    bool error;
    TickType_t last_error_tick;
    TickType_t error_timeout;
    bool mute;
    TickType_t last_mute_tick;
    TickType_t mute_timeout;
    unsigned char packet_try_send;
    TickType_t state_transition_tick;
    TickType_t time_in_state;
    TickType_t last_packet_send_bind_tick;
    TickType_t last_packet_send_work_tick;
    TickType_t last_packet_send_conf_tick;
    TickType_t last_packet_recieve_bind_tick;
    TickType_t last_packet_recieve_work_tick;
    TickType_t last_packet_recieve_conf_tick;
    TickType_t send_timeout_bind;
    TickType_t send_timeout_work;
    TickType_t send_timeout_conf;
    TickType_t recv_timeout_bind;
    TickType_t recv_timeout_work;
    TickType_t recv_timeout_conf;
    TickType_t last_change_channel_tick;
    TickType_t change_channel_timeout;
} ProtocolCtrl;
```

Рисунок 28 – Структура ProtocolCtrl

ВКРБИТУ

```
void protocol_work_loop(){
    protocol_ctrl_calculate_timeouts(); //Расчет таймаутов
    _new_state = protocol_ctrl._state_func(); //Обработка текущего состояния и получение следуещего

    if (protocol_ctrl._state_func != _new_state){ // Если произошла смена состояния
        protocol_ctrl.state_transition_tick = xTaskGetTickCount(); //Запись времени перехода
        protocol_ctrl._state_func = _new_state; //Запись нового состояние
        protocol_ctrl.state_init_flag = true; //Флаг инициализации
    }
}
```

Рисунок 29 – Основной цикл работы протокола

Очередь отправки/приема пакета ограничивается размером 64 байт. Для работы с модулем CC1101 в используемой библиотеке зарезервированы 3 байта для обозначения длинны пакета, флага проверки CRC кода и уровня сигнала полученного пакета. В итоге остается 61 байт. С учетом ограниченности пакета по размеру, создадим простую реализацию структуры (Рисунок 30).

```
typedef struct {
    bool direction;
    unsigned char packet_type;
    unsigned char sender_node_id;
    unsigned char reciever_node_id;
    unsigned char group_id;
    unsigned char node_id_list[SW_MAX_NODE_COUNT];
    SwCommand command_queue[8];
} SWPACKET;
```

Рисунок 30 – Структура пакета данных

В таблице 5 расписаны размер полей структуры и их описание. За работу по пересылке пакета данных отвечают направление отправки, тип пакета, отправитель, получатель и список всей группы устройств.

ВКР УлГТУ

Таблица 5 – Описание полей структуры пакета данных SWPACKET

Название поля структуры	Описание	Размер
direction	Флаг направления передачи пакета. Указывает получателю в какую сторону сети отправлять пакет дальше.	1 байт
packet_type	Тип пакета. Bind – 0xA0 Conf – 0xB0 Work – 0xC0	1 байт
sender_node_id	ID отправителя пакета.	1 байт
receiver_node_id	ID получателя пакета.	1 байт
group_id	ID группы.	1 байт
node_id_list	Массив в котором прописаны все участники сети.	2…10 байт
command_queue	Массив сообщений состоящий из структур SwCommand.	8*4(32) байт

На рисунке 31 указана структура данных, предназначенная для очереди команд. В таблице 6 приведены описания каждого поля структуры.

```
typedef struct {
    unsigned char command_sender_id;
    unsigned char command_reciever_id;
    unsigned char command_id;
    unsigned char check_counter;
} SwCommand;
```

Рисунок 31 – Структура команды

Таблица 6 – Описание полей структуры команды SwCommand

Название поля структуры	Описание	Размер
command_sender_id	ID отправителя команды.	1 байт
command_reciever_id	ID получателя команды, если байт равен 0x00 команда предназначена для всех.	1 байт
command_id	ID команды.	1 байт
check_counter	Счетчик. При отправке команды для всех, каждый участник увеличивает счетчик на одну единицу. Когда счетчик становится равен числу участников сети, то команда удаляется из очереди.	1 байт

ВКР УлГУ

3.4 Проектирование корпуса устройства

Для удобства использования устройства разработан корпус. Проектирование проведено в программе КОМПАС 3д [21], с учетом дальнейшей печати на 3д принтере. На рисунке 32 представлена схема расположения компонентов.

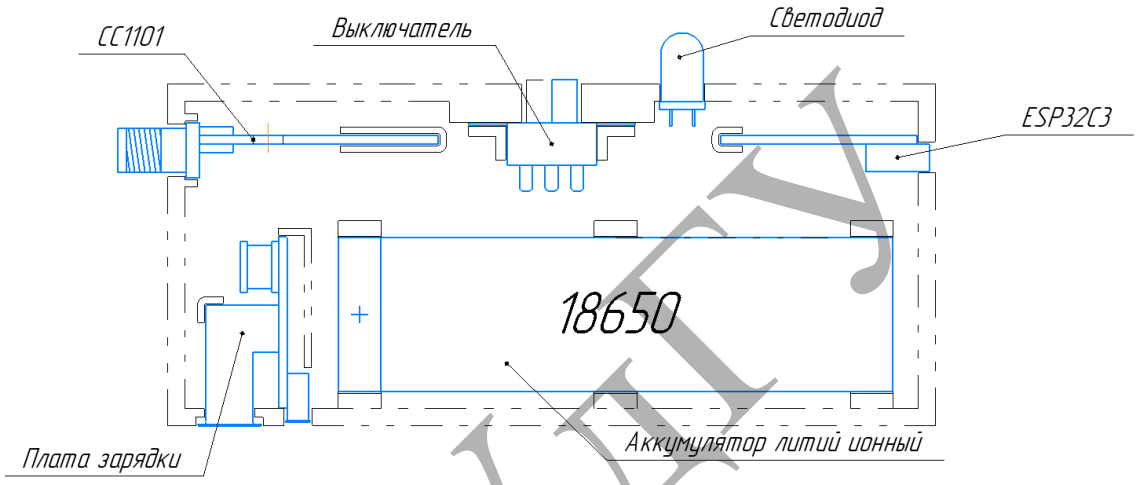


Рисунок 32 – Расположение элементов в корпусе

На основе схемы расположения компонентов была создана 3д модель, которую можно увидеть на рисунках 33-35.

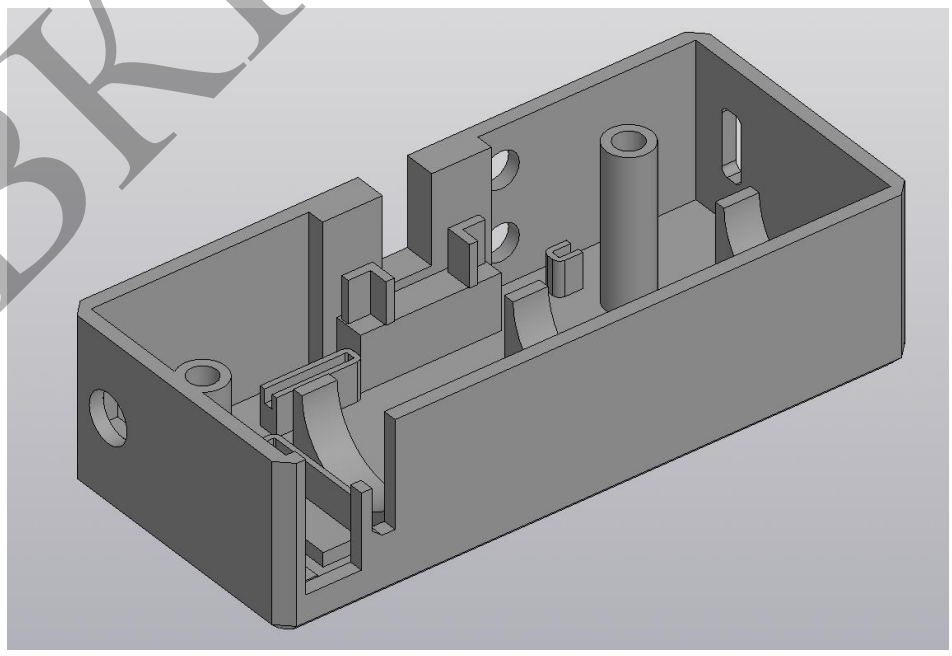


Рисунок 33 – Основная часть корпуса устройства

ВКР УлГУ

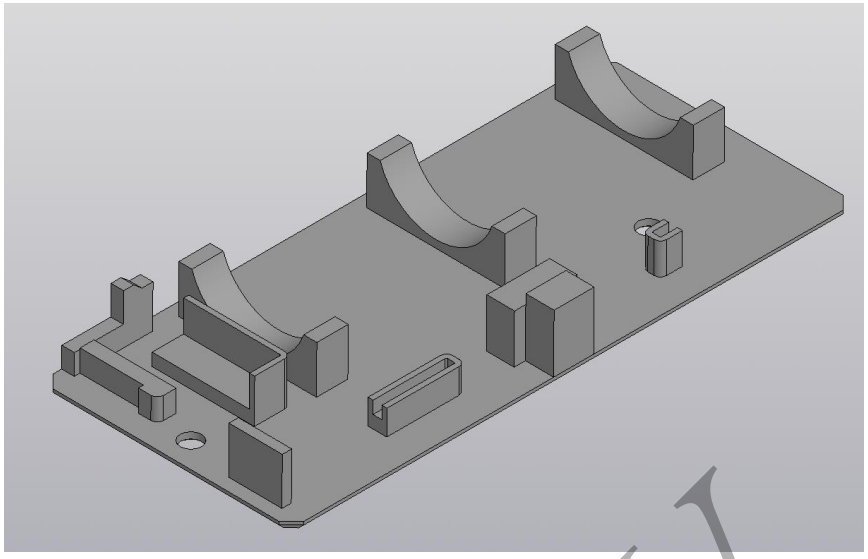


Рисунок 34 – Крышка устройства

Под каждый элемент созданы пазы для фиксации со стороны основной части корпуса и крышки.

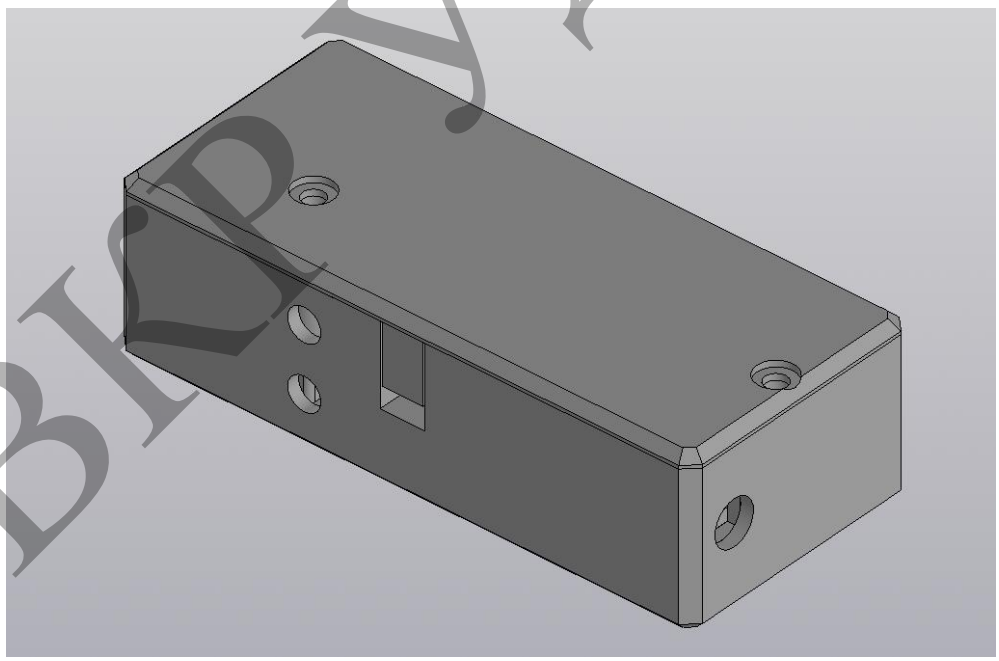


Рисунок 35 – Корпус в сборе

Печать корпуса проводится из PLA пластмассы. В корпусе предусмотрены отверстия вставки вплавляемых латунных гаек размера М3 для того, чтобы прикрутить крышку. После печати произведена пайка

ВКР УдГУ

компонентов с последующим размещением в корпусе. На рисунке 36 представлено фото собранного устройства.



Рисунок 36 – Фотография готового устройства

ВКР УлГТУ

3.5 Тестирование устройства

В изготовленном устройстве для индикации состояния использованы светодиоды. Свечение красного светодиода обозначает установленное соединение или процесс его создания. Зеленый светодиод обозначает наличие в данный момент рабочего пакета у устройства. Последовательно включаем три устройства. Между ними установится соединение и начнется процесс передачи пакета. Зеленый светодиод будет по очереди загораться на каждом устройстве, обозначая местоположение пакета. Когда пакет доходит до крайнего устройства происходит смена направления отправки.

На рисунке 37 представлен процесс работы сети. Зеленый светодиод по очереди загорается на каждом из устройств по очереди. В итоге полный цикл индикации наличия пакета по порядку устройств: 1=>2=>3=>2=>1.

ВКР УлГУ



Рисунок 37 – Процесс работы сети из трех устройств

Обеспечена стабильная работа сети, состоящая из трех устройств. В реализации выбрана задержка между отправкой пакета 400 миллисекунд. При выключении одного устройства соединение сбрасывается и впоследствии восстанавливается, сеть уже в данном случае будет состоять из 2 устройств.

ВКР УлГУ

3.6 Дальнейшая возможная реализация протокола на ПЛИС

Трансивер CC1101 не предоставляет больших возможностей в тонкой настройке параметров передающего сигнала, а микроконтроллер ESP32C3 имеет предел в оптимизации алгоритма, потому что имеет одно процессорное ядро, которое обрабатывает программу последовательно. Поэтому в дальнейшем для данного протокола предполагается разработать «гибкий» SDR трансивер на основе ПЛИС. Это позволит подобрать более подходящие параметры для реализации работы протокола. В процессе передачи и приема сигнала можно выделить основные параметры: тип модуляции, тип мультиплексирования, диапазон доступных частот, ширина полосы пропускания канала, скорость передачи данных.

ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема) – электронный компонент, который используется для создания конфигурируемых цифровых схем [22].

SDR (Software-defined radio) – программно определяемая радиосистема. Позволяет программно задавать параметры передающего сигнала или задать алгоритм обработки принимаемого сигнала. Одна система позволяет работать с сигналом, который может иметь любые свойства [23].

Потенциал данного протокола может развить использование приемника, который будет параллельно прослушивать несколько каналов связи и использование полнодуплексного режима. Прослушивая соседние группы, появится больше возможностей в оптимизации работы протокола. Возможно будет эффективнее выбрать другой тип мультиплексирования и модуляции. Все это можно реализовать на ПЛИС и оптимизировать под быструю работу. Процессорная обработка сигнала и данных не позволяет производить эффективную оптимизацию.

ВКР УлГУ

В теории при достаточной оптимизации и создания специализированного устройства для данного протокола, можно добиться высокой эффективности использования пропускной способности радиоканала. Кроме того, преимуществом предлагаемого протокола является возможность динамического изменения скорости работы. Это позволит более эффективно распределять ресурсы канала связи.

ВКР УлГУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе написания выпускной квалификационной работы были рассмотрены существующие протоколы группы стандартов IEEE 802. Был сделан вывод о малой эффективности работы Mesh сети и обоснована необходимость создания нового оригинального протокола и прототипа технического устройства для обеспечения связи по протоколу.

Был разработан новый оригинальный протокол децентрализованной связи, ориентированный на применение в беспилотных устройствах отличительной особенностью которого является использование топологии цепь и постоянного обмена рабочим пакетом. В выпускной квалификационной работе описан принцип работы протокола и алгоритм действий при различных сценариях.

Предложен прототип технического решения с использованием микроконтроллера семейства ESP32 и приемопередатчика CC1101. В рамках прототипа продемонстрировано обеспечение работы сети между устройствами.

Использование нового оригинального протокола в перспективе позволит повысить эффективность обмена данных между беспилотными устройствами. Динамически настраивая параметры работы протокола, можно будет создать режимы использования под разные задачи, например жертвуя скоростью обмена ради более экономного использования радиоспектра и размещение большего количества участников или создание режима скрытого обмена, что обеспечит сложность обнаружения беспилотной системы связи.

Используя технологию BitTorrent, можно организовать распространение данных по сети между участниками. Доработав технологию под беспроводную связь, получится потенциально эффективная система обмена данными.

ВКР УлГУ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Centralized vs. Decentralized vs. Distributed systems [Электронный ресурс] // GeeksForGeeks. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/system-design/comparison-centralized-decentralized-and-distributed-systems/ (дата обращения: 01.05.2026).
2. Типы передачи данных [Электронный ресурс] // InfoCisco: сетевые технологии. – URL: https://infocisco.ru/types_communication.html (дата обращения: 01.05.2026).
3. Baud rate and its importance [Электронный ресурс] // GeeksForGeeks. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/baud-rate-and-its-importance/ (дата обращения: 01.05.2026).
4. Теорема Шеннона – Хартли [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона_—_Хартли (дата обращения: 01.05.2026).
5. Радиоволны [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоволны (дата обращения: 01.05.2026).
6. Амплитудная модуляция [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Амплитудная_модуляция (дата обращения: 01.05.2026).
7. Частотная модуляция [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Частотная_модуляция (дата обращения: 01.05.2026).
8. Фазовая модуляция [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фазовая_модуляция (дата обращения: 01.05.2026).
9. Multiplexing [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Multiplexing (дата обращения: 01.05.2026).

ВКР УлГУ

10. Difference Between FDMA, TDMA and CDMA [Электронный ресурс] // GeeksForGeeks. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/difference-between-fdma-tdma-and-cdma (дата обращения: 01.05.2026).
11. AES (стандарт шифрования) [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия–URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/AES_(стандарт_шифрования) (дата обращения: 01.05.2026).
12. OFDM FHSS и DSSS [Электронный ресурс] // IT-WR GROUP - URL: https://it-wr.ru/support/spravochnik/technology/ofdm-fhss-and-dsss (дата обращения: 01.05.2026).
13. IEEE 802 [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802 (дата обращения: 01.05.2026).
14. Беспроводная ad-hoc-сеть [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Беспроводная_ad-hoc-сеть (дата обращения: 01.05.2026).
15. Ячеистая топология [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ячеистая_топология (дата обращения: 01.05.2026).
16. Andreoni Lopez, M. Towards Secure Wireless Mesh Networks for UAV Swarm Connectivity: Current Threats, Research, and Opportunities [Электронный ресурс] / M. Andreoni Lopez, M. Baddeley, W. T. Lunardi, A. Pandey, J.-P. Giacalone, M. A. Khan, H. Menouar, M. Guizani // arXiv.org. — 2021. — arXiv:2108.13154v1 [cs.NI]. — URL: https://arxiv.org/pdf/2108.13154v1 (дата обращения: 01.05.2026).
17. Token Ring [Электронный ресурс] // Data Network Resource - URL: https://www.rhyshaden.com/tokenr.htm (дата обращения: 01.05.2026).
18. BitTorrent [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия - URL:https://ru.wikipedia.org/wiki/BitTorrent (дата обращения: 01.05.2026).

ВКР УлГУ

19. Texas Instruments. CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver datasheet (Rev. 1) [Электронный ресурс] // CHIPDIP Магазин электроники . – URL: https://static.chipdip.ru/lib/402/DOC040402717.pdf (дата обращения: 01.05.2026).
20. ESP32-C3 Series Datasheet. Ultra-Low-Power SoC with RISC-V Single-Core CPU 2.4 GHz WiFi (802.11b/g/n) and Bluetooth 5 (LE). [Электронный ресурс] // Espressif Systems Co. – Version 2.4 – 2026 – URL: https://documentation.espressif.com/esp32-c3_datasheet_en.pdf (дата обращения: 01.05.2026).
21. Никонов Вячеслав КОМПАС-3D: создание моделей и 3D-печать. – СПб.: Питер, 2020. – 208 с. – Текст: непосредственный.
22. ПЛИС [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ПЛИС (дата обращения: 01.05.2026).
23. Программно определяемая радиосистема [Электронный ресурс] // Википедия свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Программно_определяемая_радиосистема (дата обращения: 01.05.2026).

ВКР УлГУ