

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Тлепиев Арман Арыстанович

Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Образовательная программа 6В07104 – Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой ЭТиКТ

Таштай Е. Т.

«02» 06 2023 г.



**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей»

по специальности 6В07112 – Electronic and Electrical Engineering

Выполнил дипломную работу

Тлепиев А.А.

Рецензент

Директор  
«ARNAU» ЖШС

Баймухамед Т.С.

2023 г.

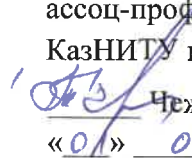


Научный руководитель

ассоц-профессор, к.т.н. каф.ЭТиКТ  
КазНУ им.К.И.Сатпаева

Чжимбаева К.С.

«01» 06 2023 г.



Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космическая технологий»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой «Электроники,  
телекоммуникации и космической  
технологий»



Таштай Е.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Дипломнику Тлепиеву Арману Арыстановичу

**Тема:** «Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей»

Утверждена приказом Ректора Университета № 408-П/Ө от «23» ноября 2023 года.

Срок сдачи законченной работы “30” апреля 2023 г.

Исходные данные к дипломной работе:

1. История развития сенсорных сетей
2. Обзор и анализ существующих технологий сенсорных сетей
3. Обзор оборудования для построения сенсорных сетей
5. Проблемы и перспективы развития сенсорных сетей
4. Сделайте выводы.

Перечень вопросов подлежащих изучить и представить в дипломной работе:

1. Анализ беспроводных сетей
2. Выбор источников и оборудования по технологии сенсорных сетей
3. Технические параметры модулей XBee Series 2
4. Запуск простейшей ZigBee-сети
5. Проведения исследований создаваемой модели
6. Подсчёт и получение результатов

Перечень графического материала: - изложить материалы диссертации в 25 -30 слайдах графического материала на PowerPoint;

Рекомендуемая основная литература:

1. Баранова Е. IEEE 802.15.4 и его программная настройка ZigBee. –Телемультимедиа, 8 мая 2008 г.
2. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
3. Калачев А. Для мобильных стражей: беспроводной стандарт Bluetooth Low Energy в системах безопасности. – Новости электроники, 2013, № 1.


## ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
1 История развития сенсорных сетей	1.09.2022-31.12.2022	Выполнено
2 Выбор источников и оборудования сенсорных сетей	1.01.2023-30.01.2023	Выполнено
3 Проектирование сенсорную сеть	1.02.2023-15.02.2023	Выполнено
4 Расчет параметров сенсорной сети	1.02.2023-15.03.2023	Выполнено
5 Моделирование сенсорных сетей с помощью рограммных обеспечений	16.02.2023-28.02.2023	Выполнено
6 Написание дипломной работы	01.04.2023-30.04.2023	Выполнено

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу.  
с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	м.т.н., ассистент Базарбай А.М.	01.06.23	

Научный руководитель  
К.С.



ассоц профессор, к.т.н. Чежимбаева

Задание принял к исполнению студент



Тлепиев Арман Арыстанович

Дата «\_\_» «\_\_\_\_» 2023 г.

## АННОТАЦИЯ

Дипломная работа представляет собой тщательное изучение применения и потенциала сенсорных сетей в разнообразных сферах промышленности и повседневной жизни. В рамках первой части работы автор представляет детальный обзор и систематизацию сенсорных сетей.

Во второй части работы осуществляется глубокий анализ технологий и стандартов в сенсорных сетях. Детально рассмотрены их сильные и слабые стороны.

Третья часть работы затрагивает вопросы создания беспроводного дома на базе ZigBee, анализа и моделирования трех различных топологий сетей ZigBee. Также рассмотрены топологии с целью определения наиболее эффективной из них.

## АНДАТПА

Диссертация сенсорлық желілердің әртүрлі салаларда және күнделікті өмірде қолданылуы мен әлеуетін мұқият зерттеу болып табылады. Жұмыстың бірінші бөлімінде автор сенсорлық желілерге егжей-тегжейлі шолу мен жүйелеуді ұсынады.

Жұмыстың екінші бөлімінде сенсорлық желілердегі технологиялар мен стандарттарға терең талдау жүргізіледі. Олардың күшті және әлсіз жақтары егжей-тегжейлі қарастырылады.

Жұмыстың үшінші бөлігінде ZigBee негізінде сымсыз үй құру, ZigBee желілерінің үш түрлі топологиясын талдау және модельдеу қарастырылады. Топологиялар олардың ең тиімдісін анықтау үшін де қарастырылады.

## ANNOTATION

The thesis is a thorough study of the application and potential of sensor networks in a variety of industries and everyday life. In the first part of the work, the author presents a detailed review and systematization of sensor networks.

In the second part of the work, a deep analysis of technologies and standards in sensor networks is carried out. Their strengths and weaknesses are considered in detail.

The third part of the work deals with the creation of a wireless home based on ZigBee, analysis and modeling of three different topologies of ZigBee networks. Topologies are also considered in order to determine the most efficient of them.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
1 Беспроводные сенсорные сети	9
1.1 История развития беспроводных сенсорных сетей	9
1.2 Ранние сенсорные сети	9
1.3 Эволюция и улучшения	10
1.4 Обзор существующих технологий сенсорных сетей	11
2 Подробное описание и сравнение различных технологий сенсорных сетей	13
2.1 Wi-Fi	13
2.2 Bluetooth и Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE)	14
2.3 ZigBee	15
2.4 Z-волна	17
2.5 LoRa (дальний радиус действия)	17
2.6 Сотовая связь (LTE-M, NB-IoT)	18
2.7 Сверхширокополосный (СШП)	19
2.8 Проблемы и перспективы развития сенсорных сетей	20
3 Анализ беспроводных сетей	23
3.1 Выбор источников и оборудования по технологии сенсорных сетей	24
3.2 Технические параметры модулей XBee Series 1 и XBee Series 2	26
3.3 Подробные характеристики и сравнения	28
3.4 Топологии ZigBee	29
3.5 Архитектура топологий ZigBee	30
4 Запуск простейшей сети ZigBee	32
4.1 Детальный разбор топологий ZigBee	34
4.2 Структура протоколов 802.15.4 или ZigBee	35
4.3 Типы устройств и их предназначение в топологиях ZigBee	37
4.4 Имитационное моделирование ZigBee топологий с использованием OPNET Modeler 14.5	39
4.5 Проведение исследования созданных модели, сбор и анализ данных	41
4.6 Подробные расчеты и результаты	47
Заключение	48
Список использованной литературы	49

## ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные сенсорные сети (WSN) — это тип сети, в которой распределенные устройства, известные как сенсорные узлы, используют датчики для мониторинга условий окружающей среды в разных местах. Эти условия могут включать температуру, влажность, вибрацию, давление, движение, загрязняющие вещества и многие другие физические свойства.

Эти небольшие и недорогие сенсорные узлы обычно состоят из нескольких частей: радиоприемопередатчика с внутренней антенной или подключением к внешней антенне, микроконтроллера, электронной схемы для взаимодействия с сенсорами и источника энергии, обычно батареи. или встроенная форма сбора энергии. Размер сенсорного узла может варьироваться от размера обувной коробки до размера пылинки, хотя функционирующие «пылинки» настоящих микроскопических размеров еще предстоит создать.

Ключевые характеристики беспроводных сенсорных сетей включают:

**Беспроводная связь:** узлы датчиков обмениваются данными по беспроводной сети, обычно по радиочастоте. Это позволяет размещать их в местах, где проводное соединение было бы непрактично.

**Возможность самоорганизации:** после развертывания сенсорные узлы автоматически образуют сеть и могут приспосабливаться к изменениям в конфигурации сети, таким как введение новых узлов или выход из строя существующих.

**Ограничения по энергопотреблению:** сенсорные узлы часто питаются от батарей и могут быть размещены в местах, где их батареи не могут быть легко заменены. В результате они должны быть эффективными в использовании энергии.

**Связь с несколькими переходами:** если конкретный узел датчика хочет отправить данные узлу, находящемуся вне диапазона его передачи, он может отправить данные через другие узлы. Это известно как многоскачковая связь.

WSN используются в широком спектре приложений, включая мониторинг окружающей среды, мониторинг и контроль промышленных процессов, приложения для здравоохранения, домашнюю автоматизацию и управление дорожным движением. Они являются неотъемлемой частью Интернета вещей (IoT), где объекты подключены к Интернету и могут собирать и обмениваться данными для различных целей.

## **1 Беспроводные сенсорные сети**

### **1.1 История развития беспроводных сенсорных сетей**

Хроника беспроводных сенсорных сетей (WSN) подчеркивает стремительное и значительное развитие цифровой электроники, беспроводной связи и сетевых систем. Возникновение WSN можно проследить до их военных корней, где они в основном использовались для наблюдения за действиями на поле боя. Однако по мере развития технологий область применения WSN значительно расширилась.

Сегодня эти сенсорные сети вышли за пределы своей первоначальной военной юрисдикции и нашли множество применений в гражданских сферах. Они стали ключевыми во многих секторах, от здравоохранения, где они контролируют жизненные показатели пациентов, до науки об окружающей среде, где они отслеживают изменения погодных условий, и до промышленной автоматизации, где они помогают оптимизировать и контролировать производственные процессы.

Более того, интеграция WSN в экосистему Интернета вещей (IoT) еще больше расширила их потенциал. Эта интеграция позволяет создавать «умные» среды, что приводит к повышению уровня эффективности и удобства в таких областях, как домашняя автоматизация, управление дорожным движением и энергосбережение, среди прочего.

Таким образом, эволюция WSN символизирует не только быстрый прогресс в области технологий, но и потенциал таких достижений для преобразования различных аспектов нашей повседневной жизни. История WSN далека от завершения, поскольку постоянные инновации обещают дальнейшее расширение их охвата и влияния в будущем.

### **1.2 Ранние сенсорные сети**

Зарождение беспроводных сенсорных сетей (WSN) восходит к 1960-м и 70-м годам, когда технология была преимущественно проводной и служила в основном военным целям. Ярким примером этих ранних развертываний была система звукового наблюдения (SOSUS), созданная ВМС США. SOSUS был разработан для отслеживания и мониторинга советских подводных лодок с помощью гидрофонов, своего рода подводного микрофона, что свидетельствует о важном применении крупномасштабных сенсорных сетей.

В 1980-х годах появились распределенные сенсорные сети, и эта трансформация во многом была обусловлена достижениями в технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Эта революция в МЭМС привела к миниатюризации датчиков, что позволило использовать их более широко и гибко. Однако потенциал этих сенсорных сетей несколько сдерживался существующими технологическими ограничениями. Несмотря на



технологические скачки, сети той эпохи столкнулись с проблемами, связанными с энергоэффективностью и коммуникационными возможностями.

На этом этапе раннего развития сенсорные сети служили основой, испытательным полигоном для новых идей и концепций. Каждая итерация, имея свой набор ограничений, способствовала постепенному совершенствованию технологии. Эти первые шаги подготовили почву для взрывного роста и диверсификации сетей беспроводных датчиков, которые мы наблюдаем сегодня.

### **1.3 Эволюция и улучшения**

Когда исследования сенсорных сетей переместились в 1990-е годы, наступила новая эра технического прогресса. Десятилетие ознаменовалось созданием более экономичных датчиков меньшего размера, которые не только имели возможности беспроводной связи, но и могли обнаруживать самые разные физические и экологические условия. Эти датчики могут измерять все, от температуры и влажности до давления и вибрации.

Возможно, самым важным достижением в этот период было включение встроенных возможностей обработки данных. Это позволило датчикам преобразовывать необработанные данные в полезную информацию перед передачей. Эта функция значительно повысила эффективность и удобство использования данных, собранных этими сетями.

Одной из наиболее заметных вех в развитии беспроводных сенсорных сетей стало создание «Умной пыли» Агентством перспективных оборонных исследовательских проектов (DARPA) в конце 1990-х годов. Цель этого проекта заключалась в разработке автономных сенсорных и коммуникационных платформ миллиметрового масштаба для масштабно распределенной сенсорной сети. Эта инициатива была новаторской, поскольку заложила основу для развития многих технологий, используемых в современных беспроводных сенсорных сетях.

В последние годы стремительное развитие Интернета вещей (IoT) открыло эру беспрецедентных возможностей подключения, в результате чего важность и применимость WSN стали более очевидными. Конвергенция WSN с IoT позволила беспрецедентно масштабно взаимодействовать датчикам, устройствам и системам, создавая бесчисленные возможности для мониторинга данных в реальном времени и принятия решений.

Традиционно сенсорные сети используются в высокотехнологичных приложениях, таких как загоризонтные системы обнаружения радиации и ядерной угрозы, датчики оружия для кораблей, биомедицинские приложения, зондирование окружающей среды и сейсмический мониторинг. Совсем недавно интерес был сосредоточен на сетевых биологических и химических датчиках для национальной безопасности; Кроме того, растет интерес к прямым потребительским приложениям.

Путь беспроводных сенсорных сетей — яркая иллюстрация постоянной эволюции и инноваций, обусловленных неустанным стремлением к созданию эффективных, надежных систем мониторинга в режиме реального времени. Поскольку мы стоим на пороге будущего, в котором WSN и IoT станут еще более переплетенными, можно только представить себе следующие этапы эволюции и развития, которые нас ждут впереди [2].

#### 1.4 Обзор существующих технологий сенсорных сетей

За последние несколько десятилетий в области технологий сенсорных сетей произошел значительный прогресс, и в настоящее время доступен целый ряд технологий. Каждая из этих технологий имеет свои особенности, что делает их подходящими для конкретных приложений.

Wi-Fi — это популярная технология беспроводной сети, которая использует радиоволны для обеспечения высокоскоростных сетевых подключений. Сенсорные сети на основе Wi-Fi могут использовать существующую интернет-инфраструктуру, что делает их экономичным выбором для многих приложений. Однако их высокое энергопотребление может быть ограничением для датчиков с батарейным питанием.

Bluetooth — это технология беспроводной связи малого радиуса действия, которая широко используется для подключения устройств, находящихся в непосредственной близости. Его вариант с низким энергопотреблением Bluetooth Low Energy (BLE) особенно подходит для сенсорных сетей благодаря значительно сниженному энергопотреблению и способности обеспечивать прерывистую передачу данных.

ZigBee — это беспроводная технология, разработанная специально для приложений с низкой скоростью передачи данных, что делает ее отличным выбором для сенсорных сетей. Он известен своим низким энергопотреблением и способностью формировать ячеистые сети, что увеличивает радиус действия и надежность сети, позволяя передавать данные с одного устройства на другое.

Z-Wave — еще одна технология радиочастотной связи с низким энергопотреблением, обычно используемая в системах домашней автоматизации. Он работает в диапазоне менее 1 ГГц, уменьшая помехи для других устройств и поддерживая ячеистую сеть.

LoRa — это маломощная беспроводная платформа дальнего действия, которая стала популярным выбором для построения сетей IoT во всем мире. Его способность передавать на большие расстояния с очень низким энергопотреблением делает его идеальным для приложений, требующих, чтобы датчики работали в течение длительного времени от одной батареи.

Сотовая связь (LTE-M, NB-IoT)

Сотовые технологии, такие как LTE-M и NB-IoT, обеспечивают широкое покрытие и высокую надежность, что делает их подходящими для сенсорных сетей, разбросанных по большим географическим территориям. Хотя эти

технологии обеспечивают отличную дальность и проникновение, они требуют более значительного источника питания, чем другие варианты, что делает их менее подходящими для датчиков с батарейным питанием.

Сверхширокополосный (СШП) UWB — это уникальная технология, которая может обеспечить точное отслеживание активов и отдельных лиц в режиме реального времени. Это идеальный выбор для приложений, требующих высокой точности позиционирования.

Каждая из этих технологий имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор технологии зависит от конкретных требований сенсорной сети, включая такие факторы, как дальность действия, энергопотребление, скорость передачи данных и стоимость. По мере развития беспроводных технологий можно ожидать появления новых технологий сенсорных сетей и усовершенствований существующих.

Любой стандарт, будь то интерфейс проводного обмена данными или беспроводной связи, создается для решения целого ряда задач. Например, WiFi позволяет общаться на средних расстояниях при относительно высоких скоростях передачи данных; позволяя передавать видео и аудио, WiFi ориентирован на применение для доступа беспроводных устройств к корпоративным сетям и Интернету. Также стандарт Bluetooth предназначен для передачи данных на небольшие расстояния. Bluetooth значительно проигрывает в скорости WiFi; Он идеально подходит для потоковой передачи аудио или видео, например, между компонентами домашнего кинотеатра. Основная задача, решаемая с помощью ZigBee, — передача небольших объемов данных на средние расстояния. Специфика назначения ZigBee заключается в том, что передающие и принимающие устройства этого стандарта должны иметь минимальное энергопотребление. С IEEE 802.15.4 и ZigBee невозможно передавать высококачественное потоковое аудио или видео высокой четкости, но можно реализовать сложные схемы контроля и управления практически в любой области [1].

## **2 Подробное описание и сравнение различных технологий сенсорных сетей**

### **2.1 Wi-Fi (беспроводная точность)**

Wi-Fi, что означает «Wireless Fidelity», представляет собой технологию беспроводной сети, которая позволяет электронным устройствам подключаться к беспроводной локальной сети (LAN), обычно используя радиодиапазоны 2,4 ГГц или 5 ГГц. Термин «Wi-Fi» часто используется как синоним «беспроводного интернета».

Технология Wi-Fi основана на семействе стандартов IEEE 802.11, которые определяют набор протоколов управления доступом к среде (MAC) и физического уровня (PHY) для реализации беспроводных локальных сетей. Стандарты включают, среди прочего, 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac и новейший стандарт 802.11ax (также известный как Wi-Fi 6). Каждый стандарт различается поддерживаемыми полосами частот, максимальными скоростями передачи данных, методами модуляции и другими техническими деталями.

Wi-Fi может обеспечивать высокую скорость передачи данных, а новейший стандарт Wi-Fi 6 теоретически поддерживает скорость до 9,6 Гбит/с. Однако фактическая скорость может быть значительно ниже из-за таких факторов, как расстояние от маршрутизатора, физические препятствия, помехи от других устройств и перегрузка сети. Сети Wi-Fi обычно имеют радиус действия до 70 метров в помещении и 250 метров на улице, но на этот диапазон также могут влиять факторы окружающей среды.

Wi-Fi используется в самых разных приложениях, от домашних и офисных сетей до общедоступных точек доступа в Интернет. Он используется для подключения ноутбуков, смартфонов, планшетов и других устройств к Интернету или друг к другу. Он также все чаще используется в различных приложениях Интернета вещей (IoT), подключая устройства умного дома, промышленные датчики и многое другое.

Преимущества Wi-Fi включают высокую скорость передачи данных, широкое распространение и тот факт, что он может использовать существующую интернет-инфраструктуру. Это делает его универсальным выбором для многих сетевых приложений.

Однако у Wi-Fi есть и некоторые недостатки. Его высокое энергопотребление может быть проблематичным для устройств с батарейным питанием. Кроме того, хотя сети Wi-Fi могут поддерживать большое количество устройств, производительность может снижаться по мере подключения большего количества устройств, особенно если несколько устройств одновременно активно передают данные.

Безопасность также может быть проблемой в сетях Wi-Fi. Хотя стандарты Wi-Fi Protected Access (WPA) обеспечивают надежную защиту, незащищенные или плохо защищенные сети Wi-Fi могут быть уязвимы для различных типов

атак. Поэтому при настройке и использовании сетей Wi-Fi важны надлежащие меры безопасности, такие как надежное шифрование и надежные пароли.

## 2.2 Bluetooth и Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE)

Bluetooth — это беспроводная технология, предназначенная для связи между устройствами на небольшом расстоянии. Он работает в промышленном, научном и медицинском (ISM) диапазоне 2,4 ГГц и использует расширенный спектр, скачкообразную перестройку частоты, полнодуплексный сигнал с номинальной скоростью 1600 скачков в секунду.

Технология Bluetooth регулируется Bluetooth Special Interest Group (SIG), и с момента ее создания она развивалась в нескольких версиях, каждая из которых предлагала улучшения по сравнению с предыдущими. Стандарт Bluetooth включает протоколы как для классического Bluetooth (иногда называемого «Bluetooth BR/EDR»), так и для Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE, также известного как «Bluetooth Smart»).

Классический Bluetooth был разработан для приложений с непрерывной потоковой передачей данных, что делает его идеальным для таких задач, как потоковая передача звука для наушников и динамиков или обработка голосовых вызовов через гарнитуру. Однако он может быть относительно энергоемким по сравнению с другими беспроводными протоколами.

С другой стороны, BLE был представлен вместе с Bluetooth 4.0 и оптимизирован для низкого энергопотребления, что делает его идеальным для устройств с батарейным питанием и приложений IoT. BLE предназначен для периодической или прерывистой передачи данных и потребляет значительно меньше энергии, чем классический Bluetooth.

Устройства Bluetooth обычно имеют радиус действия до 100 метров, в зависимости от класса мощности устройства. Однако этот диапазон может быть значительно уменьшен из-за физических препятствий или помех от других устройств.

Скорость передачи данных для Bluetooth зависит от версии и режима. Классический Bluetooth может достигать скорости передачи данных до 2-3 Мбит/с, тогда как максимальная скорость передачи данных BLE составляет 1 Мбит/с.

Bluetooth и BLE используются в самых разных приложениях. Классический Bluetooth обычно используется в беспроводных гарнитурах, автомобильных информационно-развлекательных системах, беспроводных динамиках и подобных аудиоустройствах. Он также используется для передачи данных между устройствами, например между смартфоном и ноутбуком.

BLE с его низким энергопотреблением широко используется в приложениях IoT, таких как фитнес-трекеры, умные часы, мониторы сердечного ритма, устройства для умного дома и многое другое. Он также используется в

технологии радиомаяков для позиционирования внутри помещений и определения приближения.

Основным преимуществом Bluetooth и BLE является их повсеместное распространение: Bluetooth поддерживают практически все современные смартфоны, ноутбуки и планшеты, что позволяет легко подключать устройства без необходимости в дополнительном оборудовании.

Основные недостатки Bluetooth связаны с его ограниченным диапазоном и скоростью передачи данных по сравнению с другими беспроводными технологиями, такими как Wi-Fi. Его работа в переполненном диапазоне 2,4 ГГц также может привести к проблемам с помехами.

Основным преимуществом BLE является очень низкое энергопотребление, что позволяет устройствам работать месяцами или даже годами от небольшой батареи. Однако, поскольку он предназначен для приложений с низкой скоростью передачи данных, он не подходит для приложений с высокой скоростью передачи данных, таких как потоковое аудио, которые лучше обслуживаются классическим Bluetooth или другими беспроводными технологиями.

## 2.3 ZigBee

ZigBee — это беспроводная технология, разработанная для недорогих беспроводных ячеистых сетей с низким энергопотреблением. Протокол ZigBee был разработан, чтобы обеспечить простое в использовании решение для беспроводной передачи данных, характеризующееся безопасной и надежной архитектурой беспроводной сети.

Стандарт ZigBee основан на спецификации физической радиосвязи IEEE 802.15.4 и работает в нелицензируемых диапазонах по всему миру, включая 2,4 ГГц, 900 МГц и 868 МГц. Спецификации поддерживаются и обновляются Альянсом ZigBee. ZigBee использует небольшие радиомодули с низким энергопотреблением, что делает его идеальным для приложений, где ключевым требованием является длительное время автономной работы.

ZigBee поддерживает различные сетевые архитектуры, включая сети типа «звезда», «ячеистая сеть» и «дерево кластеров». Из них ячеистые сети особенно полезны в крупномасштабных развертываниях, поскольку каждый узел (или «прыжок») в сети может передавать сообщения своим соседям, эффективно увеличивая радиус действия и устойчивость сети.

Скорость передачи данных ZigBee варьируется от 20 кбит/с в диапазоне частот 868 МГц до 250 кбит/с в диапазоне частот 2,4 ГГц. Диапазон связи обычно составляет до 100 метров в условиях прямой видимости, но его можно расширить за счет ячеистой сети, где каждое устройство в сети может передавать данные.

ZigBee используется в самых разных приложениях и отраслях. К ним относятся домашняя автоматизация (выключатели света, интеллектуальные термостаты), здравоохранение (мониторинг пациентов), промышленный

контроль (отслеживание активов, автоматическое считывание показаний счетчиков) и даже в сельскохозяйственных условиях (датчики влажности почвы, автоматизированные системы орошения).

Одним из основных преимуществ ZigBee является низкое энергопотребление, что позволяет устройствам годами работать от одной батареи. Его поддержка ячеистых сетей также означает, что он может покрывать большие площади, чем позволяет беспроводная связь с одним прыжком.

ZigBee также обеспечивает высокий уровень безопасности с дополнительным использованием шифрования AES-128 и может поддерживать большое количество узлов (более 65 000) в одной сети.

Однако низкая скорость передачи данных ZigBee означает, что он не подходит для приложений, требующих высокой пропускной способности. Его диапазон, хотя и может быть расширен за счет ячеистой сети, все еще относительно мал по сравнению с некоторыми другими беспроводными технологиями. Наконец, хотя устройства ZigBee, как правило, совместимы, иногда могут возникать проблемы совместимости между устройствами разных производителей.

Технология ZigBee не предназначена для передачи больших объемов информации, как Wi-Fi или Bluetooth. Однако для передачи, например, показаний датчиков, объем которых редко превышает десятков байт, не требуется высоких скоростей – в этом случае обязательны высокие показатели по энергопотреблению, цене и надежности. Большинство устройств ZigBee будет работать по следующему алгоритму: устройство находится в «спящем» состоянии практически все время, обеспечивая оптимальный режим энергосбережения [4].

## 2.4 Z-волна

Z-Wave — это протокол беспроводной связи, используемый в основном для домашней автоматизации. Он обеспечивает надежную передачу небольших пакетов данных с малой задержкой и очень эффективен в приложениях управления и считывания состояния, где важна своевременная и надежная связь.

Z-Wave работает в диапазоне менее 1 ГГц и избегает помех от Wi-Fi и других высокочастотных сетей. В отличие от ZigBee, основанного на стандарте IEEE 802.15.4, Z-Wave использует собственный стандарт, разработанный датской компанией Zensys.

Z-Wave использует более простой протокол, чем ZigBee, что упрощает его настройку и управление, но также снижает его гибкость. Как и ZigBee, Z-Wave поддерживает ячеистую сеть, при этом каждое устройство Z-Wave может действовать как повторитель сигнала. Каждая сеть Z-Wave может содержать до 232 устройств, что значительно меньше, чем сеть ZigBee.

Что касается скорости передачи данных, Z-Wave медленнее, чем ZigBee и Wi-Fi, с максимальной скоростью передачи данных 100 кбит/с. Однако для типов

приложений, в которых он используется, этого обычно достаточно. Радиус действия устройства Z-Wave составляет около 30 метров в помещении, но этот диапазон может быть расширен за счет ячеистой сети, при этом каждое устройство способно совершать до 4 скачков, чтобы добраться до места назначения.

Z-Wave чаще всего используется в системах домашней автоматизации, включая управление освещением, системы безопасности, термостаты, окна, замки, бассейны и устройства открывания гаражных ворот. Он также используется в некоторых системах коммерческого освещения и управления HVAC.

Преимущества Z-Wave включают низкий уровень помех, учитывая его работу в диапазоне менее 1 ГГц, и его простоту по сравнению с более сложными протоколами, такими как ZigBee. Его поддержка ячеистой сети также является преимуществом в более крупных установках.

Однако патентованный характер Z-Wave означает, что все устройства Z-Wave должны быть сертифицированы Z-Wave Alliance, что может увеличить их стоимость. Он также имеет более низкий максимальный предел устройств, чем ZigBee, а более низкая скорость передачи данных делает его менее подходящим для приложений, требующих высокой пропускной способности.

## **2.5 LoRa (дальний радиус действия)**

LoRa — это маломощная беспроводная платформа дальнего действия, которая стала одним из стандартных вариантов построения сетей Интернета вещей (IoT) по всему миру.

LoRa, сокращенно от «Long Range», представляет собой метод модуляции с расширенным спектром, основанный на технологии чирпа с расширенным спектром (CSS). Он был разработан Semtech, производителем полупроводников. Эта технология используется в сочетании с LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), протоколом уровня управления доступом к среде (MAC) для управления связью между шлюзами LPWAN и устройствами конечных узлов, разработанным LoRa Alliance.

LoRa работает в субгигагерцовом диапазоне частот, и это физический уровень или беспроводная модуляция, используемая для создания канала связи дальнего действия.

LoRa известна своими возможностями дальнего действия: один шлюз может покрывать большую территорию. Точный диапазон зависит от окружающей среды: в сельской местности с минимальными препятствиями сигнал LoRa может достигать 15-20 километров. В условиях плотной городской застройки диапазон обычно составляет около 2-5 километров.

Скорость передачи данных для LoRa варьируется от 0,3 кбит/с до 50 кбит/с. Хотя этого достаточно для многих приложений Интернета вещей, где устройствам необходимо периодически отправлять небольшие объемы данных,



это не подходит для приложений, требующих высокой скорости передачи данных.

LoRa и LoRaWAN часто используются для приложений IoT, которым необходимо отправлять небольшие объемы данных на большие расстояния несколько раз в час или даже один раз в день. К ним относятся интеллектуальные измерения, носимые устройства, мониторинг окружающей среды и интеллектуальное сельское хозяйство.

Основным преимуществом LoRa является большой радиус действия в сочетании с низким энергопотреблением, что делает его идеальным для устройств с батарейным питанием, которым необходимо отправлять данные на большие расстояния. Он также работает в безлицензионном спектре, поэтому нет никаких текущих затрат, связанных с использованием спектра.

Однако низкая скорость передачи данных LoRa означает, что она не подходит для приложений, требующих передачи больших объемов данных, таких как потоковое видео. Его большая дальность также может быть недостатком в городских условиях, где сигналы могут мешать друг другу. Кроме того, поскольку LoRa работает в нелицензируемом спектре, она может испытывать помехи от других устройств, работающих в той же полосе частот.

## **2.6 Сотовая связь (LTE-M, NB-IoT)**

Сотовая связь IoT относится к использованию сотовых сетей, включая технологии 4G и 5G, для подключения устройств IoT. Двумя ключевыми технологиями в этой области являются LTE-M (Long Term Evolution for Machines) и NB-IoT (узкополосный IoT), обе из которых являются стандартами, определенными Проектом партнерства 3-го поколения (3GPP).

LTE-M — это технология глобальной сети с низким энергопотреблением (LPWA) для приложений IoT, которая работает в сетях LTE (4G) операторов связи. Он предлагает более низкое энергопотребление, расширенное покрытие и поддержку большого количества устройств.

LTE-M поддерживает скорость передачи данных до 1 Мбит/с, позволяет осуществлять голосовую связь и поддерживает мобильные соединения (переключение между вышками сотовой связи), что делает его подходящим для устройств, которым необходимо отправлять большие объемы данных или перемещаться, например, для отслеживания устройства.

NB-IoT, с другой стороны, предназначен для статических устройств, которым необходимо передавать только небольшие объемы данных в течение длительных периодов времени. Он работает в очень узком диапазоне частот (200 кГц), что делает его чрезвычайно эффективным с точки зрения энергопотребления и обеспечивает превосходное проникновение в закрытых помещениях и под землей.

NB-IoT предлагает более низкую скорость передачи данных, чем LTE-M (около 250 кбит/с), не поддерживает голосовую связь или мобильность, но

является отличным выбором для простых датчиков и устройств, которые нечасто отправляют данные.

Как LTE-M, так и NB-IoT используются в широком спектре приложений IoT. LTE-M с его более высокими скоростями передачи данных и поддержкой мобильности часто используется для носимых устройств, трекеров и других приложений, требующих связи в реальном времени. NB-IoT с его сверхнизким энергопотреблением и отличным покрытием внутри помещений часто используется для интеллектуальных счетчиков, датчиков окружающей среды и других статических устройств, которые отправляют небольшие объемы данных.

Основным преимуществом как LTE-M, так и NB-IoT является использование ими установленных сотовых сетей, что обеспечивает отличное покрытие и качество обслуживания, а также высокую безопасность. Оба они также обеспечивают низкое энергопотребление, что имеет решающее значение для устройств IoT с батарейным питанием.

Основным недостатком этих технологий является стоимость: модули сотового IoT обычно дороже, чем модули для других технологий LPWA, таких как LoRa или Sigfox. Существуют также текущие расходы, связанные с использованием сотовой сети, обычно оплачиваемые в виде подписки. Кроме того, поскольку эти технологии основаны на сотовой сети, на них могут повлиять изменения в сети, такие как поэтапный отказ от старых сетевых технологий.

## 2.7 Сверхширокополосный (UWB)

Сверхширокополосный (UWB) — это протокол беспроводной связи, который использует очень большую полосу пропускания (более 500 МГц) для обеспечения высокоскоростной передачи данных на короткие расстояния. UWB известен своими возможностями точного отслеживания, что делает его особенно подходящим для приложений, требующих точного позиционирования.

UWB использует большую часть радиочастотного спектра, передавая данные в широком диапазоне частот с очень низкой мощностью. Это позволяет UWB достигать высоких скоростей передачи данных и снижает вероятность помех другим сигналам.

Федеральная комиссия по связи (FCC) в США одобрила коммерческое использование UWB для передачи данных в 2002 году. IEEE определил первоначальный стандарт для UWB в 2007 году как 802.15.4a, и с тех пор он продолжает развиваться.

UWB может достигать очень высоких скоростей передачи данных, до 1 Гбит/с на более коротких расстояниях (менее 10 метров). На больших расстояниях (до 200 метров) скорость передачи данных снижается, но все еще достаточно высока по сравнению с другими беспроводными технологиями малого радиуса действия.

Одной из наиболее примечательных особенностей UWB является его способность очень точно измерять расстояние на основе времени, которое

требуется радиоволне для прохождения от передатчика к приемнику. Это делает UWB отличным выбором для приложений, требующих точного отслеживания местоположения, часто с точностью до 10 сантиметров.

UWB имеет широкий спектр приложений, включая высокоскоростную передачу данных, системы определения местоположения в реальном времени (RTLS) и радиолокационные системы. Совсем недавно он использовался в потребительских устройствах, таких как смартфоны и носимые устройства, для таких приложений, как безопасный доступ без помощи рук (например, для отпирания автомобилей или дверей) и высокоскоростная передача данных на близком расстоянии.

Основным преимуществом UWB является высокая скорость передачи данных и возможности точного позиционирования. Использование большого диапазона частот также снижает риск помех другим сигналам.

Основными недостатками UWB являются относительно небольшой радиус действия и более высокое энергопотребление по сравнению с другими беспроводными технологиями, такими как Bluetooth Low Energy (BLE). Необходимость прямой видимости также может ограничивать его использование в определенных условиях. Кроме того, хотя использование UWB разрешено во многих странах, правила различаются, а в некоторых местах оно не разрешено или строго ограничено.

## **2.8 Проблемы и перспективы развития сенсорных сетей**

Сети беспроводных датчиков (WSN) произвели революцию в ряде отраслей, от сельского хозяйства до здравоохранения, логистики и мониторинга окружающей среды. Однако, наряду с их многочисленными преимуществами, существует ряд проблем, которые необходимо решить. В то же время область сенсорных сетей быстро развивается, открывая много интересных возможностей на будущее.

**Энергоэффективность.** Учитывая, что многие сенсорные узлы питаются от батарей, оптимизация энергопотребления является серьезной проблемой. Многие датчики развернуты в труднодоступных местах, что делает непрактичной частую замену батарей. Таким образом, повышение энергоэффективности сенсорных узлов, и разработка методов сбора энергии являются серьезными проблемами.

**Безопасность.** Сенсорные сети часто передают конфиденциальные данные, что делает их потенциальной мишенью для кибератак. Обеспечение безопасности и конфиденциальности данных в WSN является сложной проблемой из-за ограничений ресурсов сенсорных узлов и незащищенного характера беспроводной связи.

**Масштабируемость:** по мере увеличения количества сенсорных узлов в сети управление и обработка данных со всех этих узлов усложняются. Поэтому

создание масштабируемых сетевых архитектур и алгоритмов обработки данных является ключевой задачей.

**Надежность:** сенсорные узлы часто развертываются в суровых или нестабильных условиях, где они могут выйти из строя. Обеспечение надежности сбора и передачи данных в этих условиях может оказаться сложной задачей.

**Интернет вещей (IoT):** Интернет вещей является одним из основных факторов развития сенсорных сетей. По мере того, как все больше устройств будут поддерживать IoT, мы можем ожидать увеличения сложности и возможностей сенсорных сетей.

**Расширенные меры безопасности:** по мере того, как риски безопасности, связанные с сенсорными сетями, становятся все более очевидными, вероятно, будет уделяться больше внимания разработке расширенных мер безопасности для этих сетей. Это может включать в себя более надежные методы шифрования или интеграцию технологии блокчейн для защиты транзакций данных.

В начале 1999 года Исследователи Калифорнийского университета разработали датчик в виде таблетки диаметром около 5 мм. К. 2001 г. габариты сенсора планируют уменьшить до 1-2 мм. Для датчиков с такими размерами (или даже меньшими) использовался условный термин «умная пыль», что и определило название программы.

Вновь созданные микроминиатюрные датчики характеризуются высокой востребованностью для решения военных и гражданских задач. Поэтому процесс разработки этих датчиков по мере достижения практических результатов будет получать приток значительных новых средств и будет, по-видимому, носить резко ускоренный характер. Есть основания полагать, что прогностическая оценка, сделанная американскими специалистами десять лет назад, подтверждает наступление эры микроминиатюрных датчиков в электронике.

Микроминиатюрные датчики занимают важное место в сфере гражданской деятельности. Далеко не полный перечень задач, которые могут решать такие датчики, включает в себя экологический, метеорологический, геофизический относительно малозатратный глобальный мониторинг, обследование городских транспортных потоков, медицинскую внутрисполостную диагностику, телемедицинский контроль, обследование протяженных трубопроводов.

На базе сенсоров нового поколения можно будет строить системы, обеспечивающие доступ к самой обширной информации о материальном мире в информационных сетях, в том числе в сети Интернет. В отличие от существующей практики получение этой информации может осуществляться без участия человека.

В заключение, хотя сенсорные сети в настоящее время сталкиваются с рядом проблем, эта область также предлагает много интересных возможностей. Поскольку технологии продолжают развиваться, мы можем ожидать, что сенсорные сети станут еще более интегрированными в нашу повседневную жизнь [3].

### 3 Анализ беспроводных сетей

Анализ беспроводных сетей включает в себя изучение их производительности, надежности, безопасности и других характеристик. Цель состоит в том, чтобы понять поведение сети в различных условиях, выявить любые проблемы или узкие места и предложить улучшения.

Производительность беспроводной сети в первую очередь оценивается по ее пропускной способности, задержке и джиттеру:

Пропускная способность — это количество данных, которое может быть передано по сети за заданный промежуток времени. Обычно он измеряется в килобитах в секунду (Кбит/с), мегабитах в секунду (Мбит/с) или гигабитах в секунду (Гбит/с).

Формула пропускной способности:

$$U = I/t \quad (3.1)$$

где:  $I$  – информационный объем,

$t$  - время передачи.

Задержка — это время, необходимое пакету данных для перемещения из одной точки сети в другую. Обычно измеряется в миллисекундах (мс).

Джиттер — это изменение задержки. Другими словами, это разница во времени, затрачиваемом пакетами на перемещение от источника к месту назначения.

Джиттер обычно определяется как вариация задержки передачи пакетов данных. Это изменение во времени прихода пакетов данных от отправителя к получателю.

Формула для расчета джиттера может быть представлена следующим образом:

$$J = |(R1 - R2) - (S1 - S2)| \quad (3.2)$$

где:  $R1$  и  $R2$  - времена приема двух последовательных пакетов,

$S1$  и  $S2$  - времена отправки этих же пакетов.

Надежность в беспроводных сетях обычно измеряется коэффициентом потери пакетов, который представляет собой процент пакетов, потерянных во время передачи. Высокая потеря пакетов может привести к низкому качеству обслуживания, особенно в таких приложениях, как потоковое видео или VoIP, где передача данных в реальном времени имеет решающее значение.

Беспроводные сети могут быть уязвимы для различных угроз безопасности, включая прослушивание, атаки типа «человек посередине» и атаки типа «отказ в обслуживании». Анализ сетевой безопасности включает в себя оценку эффективности мер безопасности сети, таких как механизмы шифрования и аутентификации, и выявление любых потенциальных уязвимостей.

Покрытие относится к географической области, в пределах которой сеть может предоставлять услуги. Емкость, с другой стороны, относится к максимальному количеству устройств, которые сеть может поддерживать одновременно. Оба эти фактора могут существенно повлиять на производительность и надежность сети.

Эффективное управление сетью имеет решающее значение для поддержания производительности, надежности и безопасности беспроводной сети. Сюда входят такие задачи, как планирование сети, настройка, мониторинг и устранение неполадок.

Проведя тщательный анализ беспроводной сети, вы сможете лучше понять возможности и ограничения сети, определить области для улучшения и принять обоснованные решения об обновлении или расширении сети.

### **3.1 Выбор источников и оборудования по технологии сенсорных сетей**

Выбор источников и оборудования для беспроводной сенсорной сети (WSN) зависит от конкретных требований приложения, включая мощность, радиус действия, пропускную способность, стоимость и безопасность. Ниже приведены некоторые ключевые соображения для основных технологий WSN.

Устройства Zigbee известны своим низким энергопотреблением и способностью формировать ячеистые сети, что делает их подходящими для приложений, требующих длительного времени автономной работы и надежного сетевого подключения. При выборе оборудования Zigbee учитывайте следующее:

**Источник питания:** устройства Zigbee обычно питаются от батареи, поэтому ищите оборудование с длительным временем автономной работы или возможностью работы с технологиями сбора энергии.

**Диапазон:** устройства Zigbee обычно имеют радиус действия 10–100 метров, но его можно увеличить с помощью ячеистой сети.

**Безопасность:** Zigbee поддерживает 128-битное шифрование AES для безопасной передачи данных.

Wi-Fi является распространенным выбором для приложений, которым требуется высокая скорость передачи данных на относительно небольшом расстоянии. Основные соображения включают:

**Полоса пропускания:** Wi-Fi предлагает более высокие скорости передачи данных, чем многие другие технологии WSN, что может быть важным преимуществом для приложений, которым требуется высокоскоростная передача данных.

**Питание:** устройства Wi-Fi, как правило, потребляют больше энергии, чем другие технологии WSN, поэтому они могут быть не лучшим выбором для приложений с питанием от батареи.

Bluetooth подходит для соединений «точка-точка» на короткие расстояния, тогда как BLE оптимизирован для низкого энергопотребления и может поддерживать большое количество соединений. При выборе оборудования Bluetooth или BLE учитывайте:

Диапазон: устройства Bluetooth и BLE обычно имеют диапазон до 100 метров.

Питание. Устройства BLE рассчитаны на низкое энергопотребление и могут годами работать от одной батарейки типа «таблетка».

Сотовый Интернет вещей (LTE-M, NB-IoT)

Технологии сотового Интернета вещей, такие как LTE-M и NB-IoT, подходят для приложений, которым требуется широкое покрытие и высокая надежность. Основные соображения включают:

Покрытие: Сотовые устройства IoT могут работать везде, где есть покрытие сотовой связи, что делает их подходящими для приложений на больших территориях.

Стоимость. Для устройств сотового Интернета вещей требуется подписка на тарифный план сотовой связи, что может увеличить общую стоимость владения.

В заключение, выбор источников и оборудования для БСС должен основываться на тщательном анализе требований приложения и характеристик доступных технологий.

Z-волна известен своим низким энергопотреблением и высокой эффективностью, что делает его хорошим кандидатом для систем домашней автоматизации и других подобных приложений. При выборе оборудования Z-Wave учитывайте:

Совместимость: устройства Z-волна от разных производителей могут без проблем работать вместе, что упрощает расширение вашей сети в будущем.

Диапазон: устройства Z-волна обычно имеют диапазон до 100 метров на открытом пространстве, но его можно увеличить с помощью ячеистой сети.

Безопасность: Z-волна поддерживает шифрование AES128, безопасность S2 и настройку SmartStart для безопасной и простой установки устройства.

LoRa — это маломощная беспроводная платформа дальнего действия, которая часто используется для сетей IoT. При выборе оборудования LoRa учитывайте:

Диапазон: Устройства LoRa могут обмениваться данными на расстоянии до 15 километров в сельской местности, что делает их отличным выбором для применения в сельском хозяйстве или мониторинге окружающей среды.

Питание. Устройства LoRa известны своим низким энергопотреблением, что позволяет увеличить время автономной работы, что имеет решающее значение для устройств IoT, развернутых в удаленных местах.

Сверхширокополосная (UWB) — это радиотехнология, которая может использовать очень большую полосу пропускания при сохранении низкого уровня мощности. Он часто используется для приложений, требующих высокой

точности и аккуратности, таких как системы позиционирования внутри помещений. При выборе СШП оборудования учитывайте:

**Точность:** Устройства UWB могут обеспечивать точность на уровне сантиметра, что делает их хорошим выбором для приложений точного позиционирования и отслеживания.

**Скорость передачи данных:** UWB может поддерживать очень высокие скорости передачи данных, до 1 Гбит/с, что может быть преимуществом для приложений, требующих передачи больших объемов, данных за короткий период времени.

Тщательно изучив конкретные потребности вашей сети и различные аспекты этих технологий, вы сможете принять взвешенное решение при выборе подходящих источников и оборудования.

### 3.2 Технические параметры модулей XBee Series 1 и XBee Series 2

Модули XBee производства Digi International широко используются в беспроводных сенсорных сетях, особенно в приложениях, требующих маломощной и надежной связи. Они доступны в двух основных сериях: Series 1 (802.15.4) на рисунке 3.1 и Series 2 (ZigBee) на рисунке 3.2. Обе радиостанции Series 1 и Series 2 доступны с двумя разными мощностями передачи: обычный и PRO. В таблице 3.1 представлены сравнительные технические характеристики.

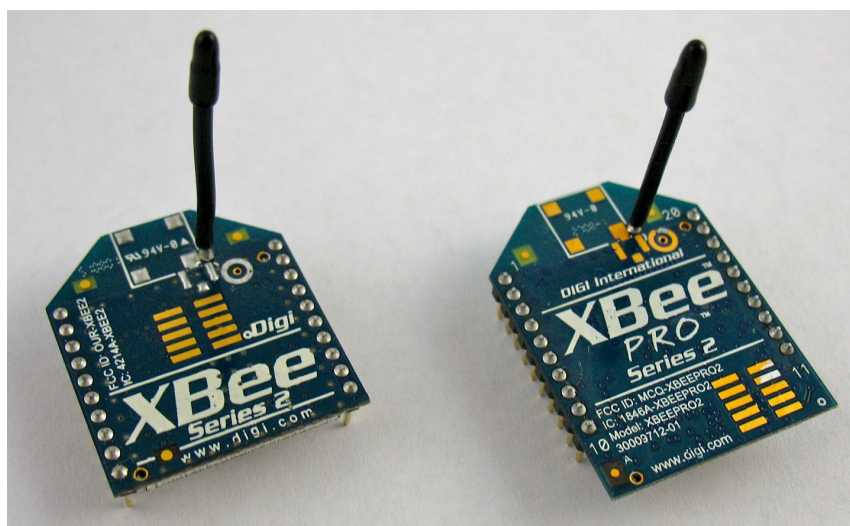


Рисунок 3.1 – Xbee Series 2 обычный и PRO версии



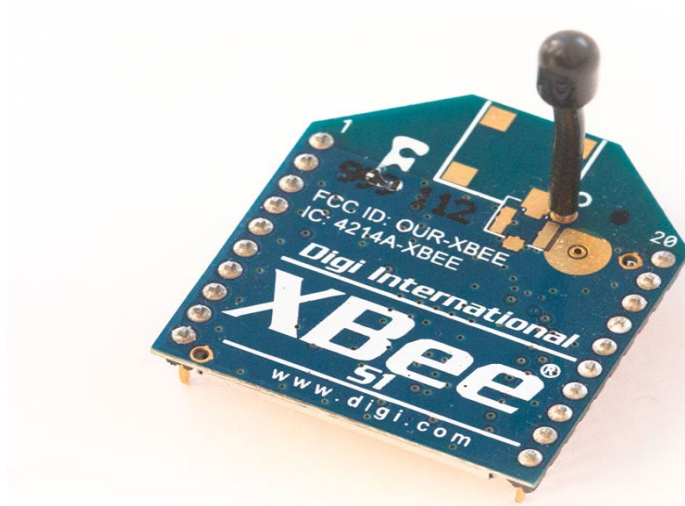


Рисунок 3.2 – Xbee Series 1(802.15.4)

Таблица 3.1 - Сравнение технических параметров Series 1 и 2

Параметры	Series 1	Series 2
Дальность действия (в помещениях, городе)	30 метров	40 метров
Наилучшая дальность действия (в прямой видимости)	100 метров	120 метров
Ток передачи/приёма	45/50 мА	40/40 мА
Прошивка (типичная)	802.15.4 (двухточечная)	ZB ZigBee Mesh
Контакты цифрового ввода-вывода	8 (плюс 1 входной сигнал)	11
Контакты аналогового входа	7	4
Аналоговые выходные контакты (PWM)	2	нет
Низкая мощность, низкая пропускная способность, низкая стоимость, адресуемые, стандартные, небольшие, популярные	да	да
Интероперабельная сетевая маршрутизация	нет	да
Двухточечные звездообразные топологии	да	да
Топологии деревьев Mesh, cluster	нет	да

Единая прошивка для всех режимов	да	нет
Требуется конфигурация узла	нет	да
Конфигурация «двухточечная»	простая	вовлеченная
Создание сетей основанных на стандартах	да	да
Приложения основанные на стандартах	нет	да
Набор микросхем	Свободный масштаб	Встроенный
Доступно встроенное ПО	802.15.4 (IEEE стандарт), DigiMesh (собственный)	ZB (ZigBee 2007), ZNet 2.5 (устаревший)
Актуальные и активно поддерживаемый	да	да

Ключевое различие между ними заключается в сетевых возможностях. В то время как Series 1 лучше подходит для простых подключений из-за простоты настройки, Series 2 предназначена для более сложных ячеистых сетей, предлагая большую гибкость, но требуя большей настройки. Важно отметить, что это общие параметры, и фактическая производительность может варьироваться в зависимости от конкретной модели и условий, в которых они используются.

### 3.3 Подробные характеристики и сравнения

При сравнении модулей XBee Series 1 и Series 2 каждый из них имеет отличительные особенности, которые делают их подходящими для различных беспроводных приложений.

Модули XBee Series 1 известны своей простотой и удобством использования, что делает их подходящими для приложений, требующих базового беспроводного соединения. Они просты в установке и не требуют какой-либо настройки сети для элементарного использования. Однако у них есть ограничения, когда речь идет о более сложных приложениях. В частности, они не поддерживают ячеистую сеть, что может ограничить их полезность в больших сетях. Кроме того, в них отсутствует встроенное шифрование для безопасной передачи данных, что является недостатком в приложениях, требующих высокого уровня безопасности.

С другой стороны, модули XBee Series 2 отличаются расширенными сетевыми возможностями, поддерживая ячеистую сеть, что позволяет создавать большие гибкие сети, в которых данные могут перемещаться от узла к узлу. Этот функционал значительно расширяет потенциальный диапазон сети. Кроме того, они поддерживают 128-битное шифрование AES, обеспечивая безопасную

передачу данных, что является важным требованием для некоторых приложений.

Однако расширенные функции модулей XBee Series 2 усложняются. Они требуют дополнительной настройки и имеют более крутую кривую обучения, что может быть чрезмерным для более простых приложений, не требующих ячеистой сети или высокозащищенной передачи данных.

Модули Series 1 и Series 2 XBee предлагают баланс производительности, энергопотребления и гибкости. Этот баланс делает их популярным выбором для самых разных беспроводных приложений. Лучший выбор между ними зависит от конкретных требований приложения — серия 1 для более простых и менее требовательных приложений и серия 2 для приложений, требующих более продвинутых сетевых функций и функций безопасности.

### 3.4 Топологии Zigbee

ZigBee известен своей способностью поддерживать различные сетевые топологии, что делает его очень универсальным для различных потребностей приложений. Вот основные типы сетевых топологий, которые может поддерживать ZigBee:

Топология «звезда»: это самая простая топология сети. В звездообразной сети все устройства (узлы) подключаются напрямую к центральному устройству, известному как координатор. Координатор отвечает за инициирование и управление связью между узлами. Каждый узел взаимодействует непосредственно с координатором, а не с другими узлами. Этот тип сети прост в настройке и управлении, но может иметь единственную точку отказа (координатор).

Древовидная топология: в древовидной сети один координатор подключен к нескольким маршрутизаторам, которые, в свою очередь, могут подключаться к другим маршрутизаторам или конечным устройствам. Это формирует иерархическую структуру, похожую на дерево, с координатором в корне. Эта топология расширяет диапазон сети, поскольку данные могут передаваться от координатора к устройству, находящемуся на расстоянии нескольких переходов. Однако это также приводит к большей сложности, поскольку необходимо управлять путями маршрутизации.

Ячеистая топология. Ячеистая сеть является наиболее гибкой и отказоустойчивой топологией. В этой конфигурации узлы (координаторы, маршрутизаторы или конечные устройства) взаимосвязаны, причем по крайней мере некоторые узлы подключены к нескольким другим. Эта избыточность означает, что если один узел выйдет из строя или потеряет соединение, сеть может автоматически перенастроиться, чтобы найти другой путь для данных, обеспечивая надежную связь. Это делает ячеистые сети подходящими для больших или сложных сред, где важна надежность.

Стоит отметить, что ZigBee в основном использует ячеистую топологию для своих сетей из-за ее гибкости и отказоустойчивости. Однако, в зависимости от специфики приложения, также может использоваться топология «звезда» или «дерево». Выбор топологии будет зависеть от таких факторов, как размер и расположение покрываемой области, количество устройств, которые должны быть включены в сеть, требуемая надежность и объем передаваемых данных.

### 3.5 Архитектура протокола ZigBee

Протокол ZigBee соответствует стандарту IEEE 802.15.4 и имеет многоуровневую структуру.

Физический уровень (PHY): это самый нижний уровень архитектуры ZigBee. Он отвечает за управление радиочастотой, передачу и прием данных, выбор канала и обнаружение энергии.

Уровень управления доступом к среде (MAC): этот уровень напрямую взаимодействует с физическим уровнем и отвечает за надежную передачу данных. Функции включают проверку кадров, доступ к каналам, адресацию устройств и многое другое.

Сетевой уровень (NWK): сетевой уровень отвечает за формирование сети, адресацию устройств, маршрутизацию и безопасность. Этот уровень управляет устройствами и их ролями в сети.

Уровень приложений (APL): этот уровень состоит из подуровня поддержки приложений (APS), объектов устройств ZigBee (ZDO) и объектов приложений, определенных производителем. Уровень приложений отвечает за сопоставление двух устройств в соответствии с их услугами и потребностями, а также за управление данными.

Сетевая архитектура ZigBee представлена на рисунке 3.3.

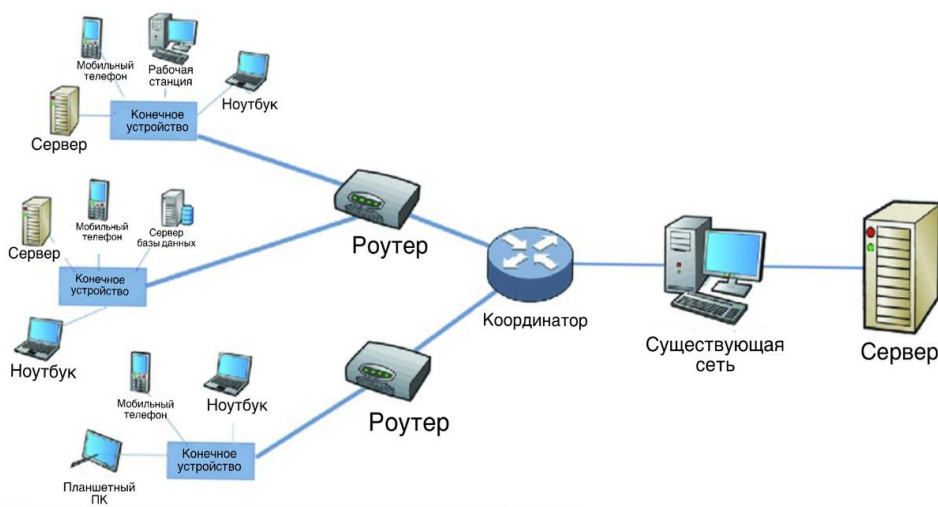


Рисунок 3.3 - Сетевая архитектура ZigBee

С точки зрения сетевой архитектуры сеть ZigBee состоит из трех типов устройств:

Координатор: в каждой сети ZigBee есть ровно один координатор, который отвечает за инициацию и обслуживание устройств в сети.

Маршрутизатор. Маршрутизаторы служат двум целям. Они могут перенаправлять сообщения с других устройств, а также запускать приложения.

Конечное устройство: конечные устройства могут обмениваться данными только со своим родительским устройством (координатором или маршрутизатором). Они не могут передавать сообщения с других устройств. Это позволяет им находиться в спящем режиме в течение длительных периодов времени, тем самым продлевая срок службы батареи.

Сети ZigBee могут быть сконфигурированы по топологии «звезда», «дерево» или «сетка». В звездообразной сети все устройства взаимодействуют через координатор. В древовидных и ячеистых сетях любое устройство (координатор, маршрутизатор) может взаимодействовать с любым соседним устройством.

Встроенный стек ZigBee отвечает за формирование и поддержание работоспособности беспроводной сети, а также за маршрутизацию сообщений. Формирование сети, подключение устройств, прокладка и восстановление маршрутов происходит автоматически, без привлечения для этих задач хост-приложения. При этом у разработчика есть возможность вносить изменения в работу стека ZigBee с помощью управляющих команд, например, устанавливать определенные частотные каналы, ограничивать время подключения к сети, задавать продолжительность сна для спящих устройств и т. д. п. Встроенный стек позволяет организовать виртуальный прозрачный канал UART между любыми узлами сети [5].

## 4 Запуск простейшей сети ZigBee

Создание простейшей ZigBee сети обычно включает следующие шаги:

1. Выбор ZigBee координатора: В каждой сети ZigBee должен быть один координатор. Координатор иницирует сеть и выбирает настройки безопасности. Это может быть специализированное устройство ZigBee (например, шлюз ZigBee), или любое устройство с ZigBee радио и необходимым программным обеспечением.

2. Запуск сети с координатором: Когда координатор запускается, он выбирает беспроводной канал, устанавливает сетевой адрес (обычно 0x0000) и открывает сеть для других устройств.

3. Добавление устройств в сеть: Устройства могут присоединиться к сети ZigBee как роутеры или конечные устройства. Роутеры могут пересылать сообщения, а конечные устройства отправляют и получают сообщения, но не пересылают их. При присоединении к сети устройству назначается уникальный сетевой адрес.

4. Сопряжение устройств: Это процесс обмена информацией между устройствами для возможности общения. Это может включать обмен ключами безопасности, если в сети используется шифрование.

5. Обмен данными: После сопряжения устройства могут начать обмениваться данными. Запросы могут быть отправлены от одного устройства к другому, а данные могут быть переданы в ответ.

6. Мониторинг и управление сетью: Координатор или другое устройство может выполнять роль "сетевого менеджера", следя за состоянием сети и реагируя на изменения (например, переадресация сообщений, если устройство выходит из сети).

Важно отметить, что каждое устройство в сети должно поддерживать соответствующий профиль ZigBee. Профили определяют стандартные виды устройств и сообщения, которые они могут обмениваться. Например, устройства в сети ZigBee Home Automation должны поддерживать профиль Home Automation.

Программное обеспечение Cisco packet tracer обладает интуитивно понятным интерфейсом, что дает пользователям возможность формировать и реализовывать топологию, просто перетаскивая элементы. Дополнительно, пользователь может легко задать характеристики устройства, сетевые настройки и интерфейсы ZigBee устройств для соответствующих компонентов. В качестве координатора был выбран домашний шлюз, также были подключены 4 маршрутизатора. На рисунке 4.1 изображена ZigBee сеть умного дома.

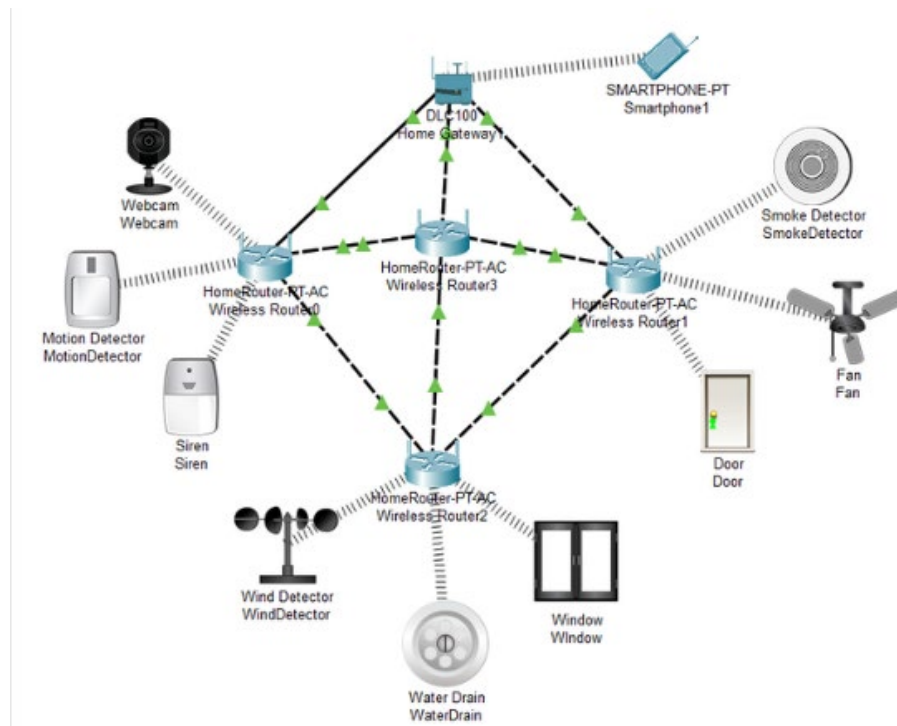


Рисунок 4.1 - ZigBee сеть умного дома с помощью Cisco Packet Tracer

Сеть умного дома на основе ZigBee - это беспроводная сеть устройств, которая обеспечивает удобное управление, мониторинг и автоматизацию различных аспектов дома. Эта сеть состоит из различных устройств, включая осветительные приборы, датчики, устройства климат-контроля, смарт-розетки, смарт-замки и многое другое, которые обмениваются информацией и выполняют задачи на основе инструкций пользователя или автоматических сценариев.

Ключевые особенности ZigBee сети умного дома:

1. Низкое энергопотребление: Устройства ZigBee разработаны для работы на батареях в течение длительного времени, что делает их идеальными для беспроводных датчиков и других устройств, которые должны быть всегда включены.

2. Меш-сеть: ZigBee использует топологию меш-сети, что позволяет устройствам обмениваться данными друг с другом напрямую или через промежуточные устройства. Это обеспечивает устойчивость и расширяемость сети, позволяя устройствам оставаться в сети, даже если некоторые другие устройства выходят из строя.

3. Безопасность: ZigBee включает в себя функции безопасности, такие как шифрование и аутентификацию, чтобы защитить данные в сети.

4. Стандартизация и совместимость: ZigBee определяет стандартные профили (например, Home Automation), которые обеспечивают совместимость между устройствами от разных производителей.

5. Контроллеры и роутеры: ZigBee сеть умного дома управляется координатором, который обычно является частью умного хаба или шлюза. Роутеры (как правило, устройства, подключенные к сети электропитания, такие

как смарт-лампы или смарт-розетки) помогают увеличить дальность сети и обеспечить ее стабильность.

6. Автоматизация : В сети умного дома можно настроить автоматические сценарии и условные действия. Например, выключение всех светов при уходе из дома или включение кондиционера, когда

На рисунке 4.2 изображена панель управления конечными устройствами сети через телефон.

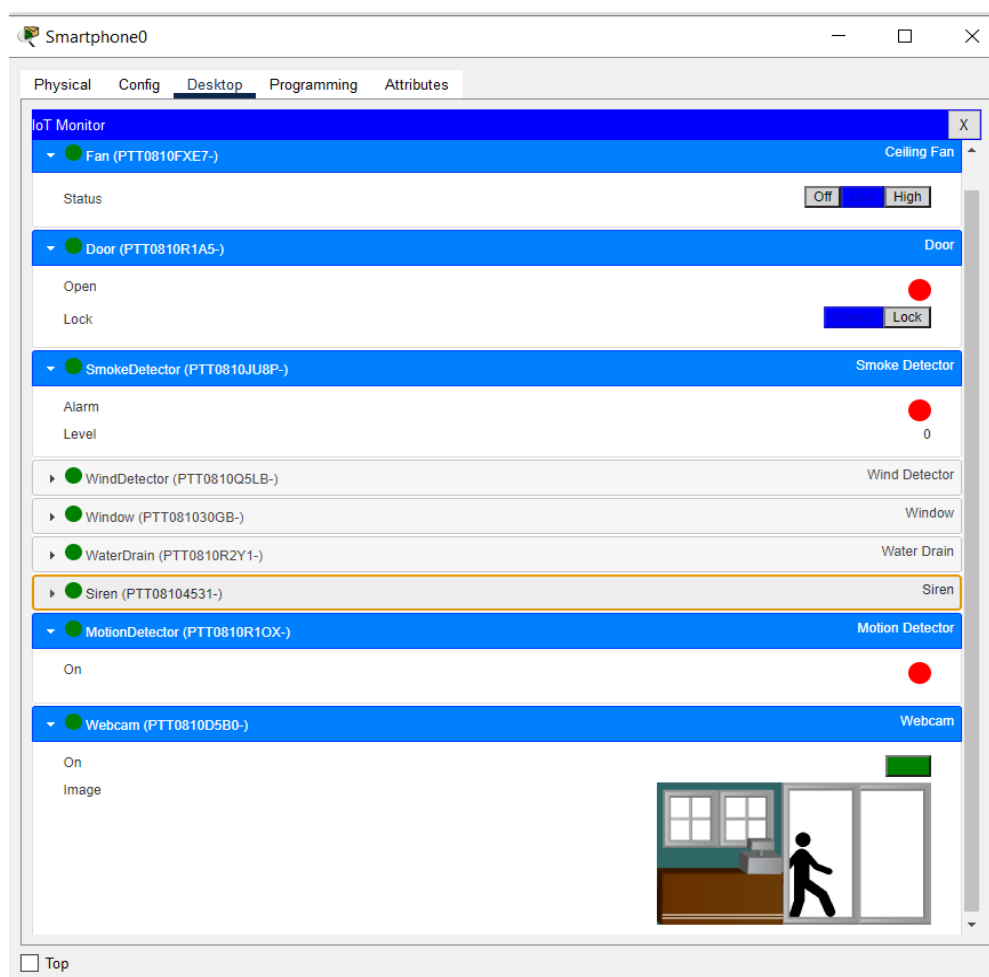


Рисунок 4.2 – Панель управления конечными устройствами с помощью телефона

#### 4.1 Детальный разбор топологий ZigBee

Протоколы IEEE 802.15.4 привлекают внимание в промышленности и исследовательской сфере как потенциальные технологии для беспроводных персональных сетей (WPAN), беспроводных сенсорных сетей (WSN) и управления беспроводными сетями. В данной статье проводится анализ различных топологий, включая Cluster-Tree, Mesh и Star, в разных сценариях для



сравнения различных показателей производительности, таких как пропускная способность, отправленный и полученный трафик, нагрузка, задержка и т.д. Из анализа выяснилось, что топология Cluster-Tree превосходит Mesh и Star топологии, так как она требует на 20% и 45% больше нагрузки по сравнению с Mesh и Star топологиями соответственно. Кроме того, ее пропускная способность, отправленный и полученный трафик, а также задержка оказались лучше, чем у двух других топологий.

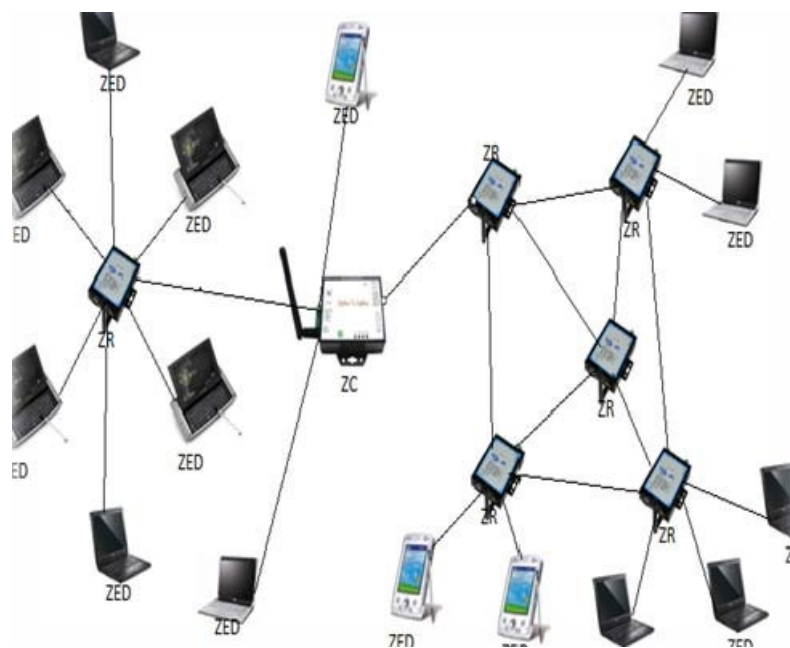


Рисунок 4.3 - Схема сети IEEE 802.15.4

В настоящее время мы активно используем различные электронные устройства, и обеспечение их беспроводной связью является острой необходимостью. Беспроводные сети, безусловно, коренным образом изменили нашу жизнь, а вместе с распространением

Интернета произвели революцию в нашем восприятии мира. В будущем беспроводные сети, в том числе и WPAN, найдут применение во множестве встроенных приложений, будь то бытовая техника, военное управление, медицина или промышленность. Эти устройства работают от батареи и общаются в определенном радиусе с помощью радиоволн.

## 4.2 Структура протоколов 802.15.4 или ZigBee

Последний стандарт WPAN, который характеризуется низким энергопотреблением и низкой скоростью передачи данных, называется IEEE 802.15.4 или ZigBee. Название ZigBee происходит от танца зигзага, которым медоносная пчела передает информацию об источнике пищи другим пчелам. Это

открытый стандарт для WPAN, применяемый в системах мониторинга и контроля.

Стандарт 802.15.4 используется в Европе и США на частоте 2,4 ГГц, а также на промышленных, научных и медицинских (ISM) частотах 868 МГц и 915 МГц. При этом скорость передачи данных составляет 20, 40 и 250 кбит/с, а в качестве методов множественного доступа используются CSMA/CA и CSMA/CA с временным разделением на слоты.

IEEE 802.15.4 формирует основу для стандарта ZigBee, определяя физический уровень для низкоскоростных беспроводных сенсорных сетей (LRWSN) и подуровень управления доступом к среде (MAC). ZigBee обеспечивает кроссплатформенную связь, которая не зависит от конкретного оборудования или программного обеспечения.

Структура протоколов 802.15.4 представлена в соответствующей диаграмме на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 - Структура протоколов 802.15.4

В стандарте 802.15.4 определено три вида устройств: 1) координатор, 2) маршрутизатор и 3) конечное устройство. Маршрутизаторы сохраняют маршруты до пунктов назначения и пересылают данные соответствующему устройству. Координатор, выполняя также функции маршрутизатора, создает, поддерживает и контролирует сеть. Координатор и маршрутизатор считаются полнофункциональными устройствами (FFD), так как они способны выполнять все функции, предусмотренные стандартом ZigBee. Конечные устройства, известные как устройства с ограниченными функциями (RFD), принимают данные от датчиков, формируют их в пакеты и пересылают адресатам. Эти устройства работают на небольших дистанциях от 10 до 20 метров.

В данной работе мы изучаем три различных топологии: звездчатую, сетевую и кластерную. Особенностью этого исследования является возможность

измерения производительности различных параметров через симуляции. Полученные результаты будут полезны для настройки ZigBee и выбора наиболее подходящей топологии в зависимости от конкретной ситуации.

Анализ разделен на 5 частей. В первой части представлено краткое описание стандарта WPAN и 802.15.4. Во второй части мы суммируем основные топологии в контексте WPAN. В третьей части представлены сценарии с различными гибридными топологиями. Четвертая часть содержит детальный анализ и обсуждение топологий, применимых к WPAN. В пятой и последней части мы делаем окончательные выводы на основе проведенного обсуждения.

### 4.3 Типы устройств и их предназначение в топологиях ZigBee

Топологии WPAN определяют физическое расположение устройств в сети. В данной статье рассматриваются три такие топологии, в которых используются три типа устройств.

1. ZC (ZigBee Coordinator) - это устройство с полной функциональностью (FFD), которое действует как координатор PAN, отвечая за настройку и поддержание сети.

2. ZR (ZigBee Router) - это также устройство с полной функциональностью (FFD), которое координирует свои действия с ZC и осуществляет мультиплексную маршрутизацию.

3. ZED (Zigbee End Device) – устройство с ограниченной функциональностью, являющееся конечным устройством сети ZigBee. Он выполняет функции маршрутизации, и другие устройства могут обмениваться данными через ZED.

В контексте звездообразной топологии, ZC выступает в роли центрального устройства, которое также известно, как ZigBee Coordinator. ZC задает уникальный идентификатор PAN ID, который не дублируется другими ZC в зоне доступа. Это представляет собой централизованную сеть, где все ZED устройства не могут взаимодействовать напрямую, но имеют возможность общаться через ZC.

На рисунке 4.5 представлена топология типа "дерево кластеров", которая схожа с сетью типа "сетка", но работает в режиме с поддержкой маяка, предоставляя только один маршрут между парой узлов. На данном изображении ZC контролирует всю сеть и координирует взаимодействие с тремя кластерами, управление которыми осуществляется через ZR.

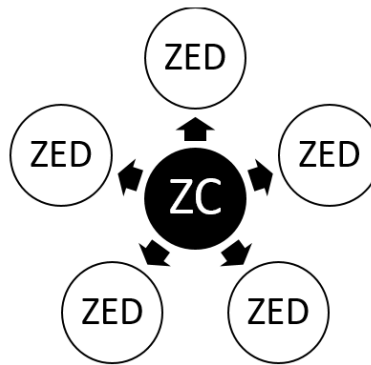


Рисунок 4.5 – Звездообразная топология

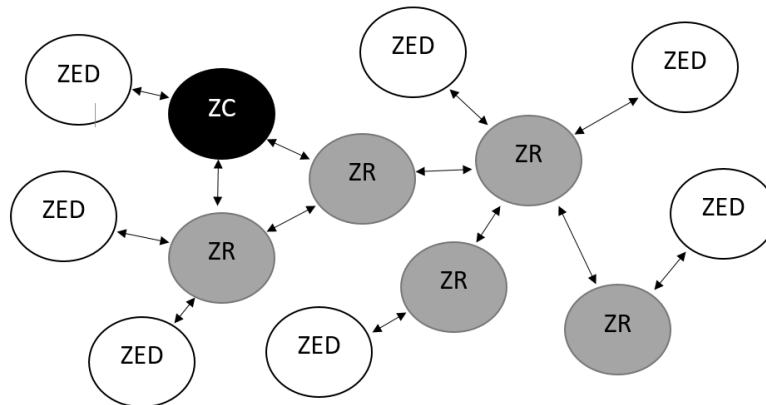


Рисунок 4.6 – Сетчатая топология

Данная сеть на рисунке 4.6 является децентрализованной, что позволяет всем устройствам общаться напрямую друг с другом в рамках их радиуса действия. Такая топология характеризуется высокой надежностью и гибкостью. На рисунке 4.7 представлена топология в виде сетки, включающая в себя координатор ZigBee (ZC), маршрутизаторы ZigBee (ZR) и конечные устройства ZigBee (ZED).

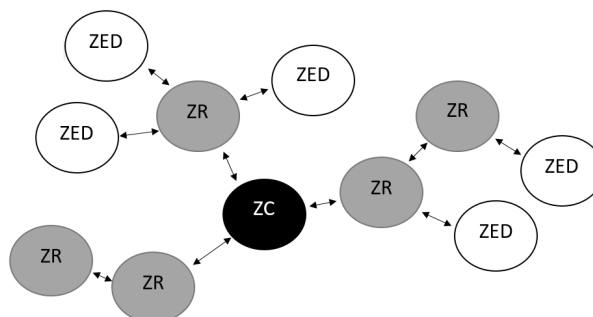


Рисунок 4.7 – древообразная топология

#### 4.4 Имитационное моделирование ZigBee топологий с использованием OPNET Modeler 14.5

Имитационное моделирование считается наиболее эффективным подходом к разработке систем с точки зрения времени и стоимости. Для разработки симуляции используется модуль ZigBee 80215.4 OPNET Modeler 14.5, поддерживающий кольцевую, звездообразную, кластерную и сетчатые топологии. В каждой из топологий применяется равное количество ZC, ZR и ZED устройств.

На рисунке 4.8 представлена звездообразная топология. В ее центре находится единый координатор PAN, вокруг которого расположены все конечные устройства. Прямое общения между двумя конечными устройствами без помощи координатора PAN невозможно. Конечное устройство должно сначала отправить данные координатору PAN, который затем пересылает эти данные другому конкретному конечному устройству.



Рисунок 4.8 – Симуляция звездообразной топологии

Структура сетчатой топологии представлена на рисунке 4.9. В этой структуре присутствует один координатор PAN, отвечающий за управление сетью. Однако, любое конечное устройство может напрямую отправлять данные другому конечному устройству, находящемуся в его радиусе действия.



Рисунок 4.9 – Симуляция сетчатой топологии

Рисунок 4.10 демонстрирует топологию "кластерное дерево", включающую в себя три маршрутизатора. Каждый из них управляет своей локальной сетью и может взаимодействовать через координатора PAN. Эта топология пользуется большой популярностью благодаря своей масштабируемости в зависимости от географического расположения.



Рисунок 4.10 – Симуляция древообразной топологии

#### 4.5 Проведение исследования созданных модели, сбор и анализ данных

В OPNET были настроены три целевые топологии в соответствии с различными параметрами моделирования, включая параметры физического уровня в таблице 4.1, управление доступом к среде MAC в таблице 4.2, восприятие несущей частоты и множественного доступа, а также трафик приложений, что подробно представлено в следующих таблицах:

Таблица 4.1 - Целевые параметры моделирования физического уровня

Физический слой	
Скорость передачи данных	Скорость передачи данных
Чувствительность приёмника	-85 дБ
Диапазон передачи	2,4 ГГц
Мощность передачи	0,05 Вт

Таблица 4.2 - Целевые параметры моделирования MAC и CSMA

MAC	
Время ожидания подтверждения	0.05
Всего ретрансляций	5
CSMA	
Показатель минимальной отсрочки 3	3
Показатель максимальной отсрочки 4	4
Длительность восприятия несущей	0.1

Таблица 4.3 - Целевой трафик приложения

Параметры	Трафик приложений					
	Тип устройства	Время прибытия пакета	Размер пакета	Время начала	Остановить время	Место назначения
Топология «звезда»	ZC	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	Все ZC и ZR

Топология «звезда»	ZR	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	ZC
	ZED	Экспоненциальный (1,0)	Экспоненциальный (1024)	Экспоненциальный (1,0)	Бесконечность	ZC
	ZC	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	Все ZC и ZR
Топология «сетка»	ZR	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	Все ZC и ZR
	ZED	Экспоненциальный (1,0)	Экспоненциальный (1024)	Экспоненциальный (1,0)	Бесконечность	Все ZC и ZR
	ZC	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	Все ZC и ZR
Топология «дерево»	ZR	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	Все ZC и ZR
	ZED	Экспоненциальный (1,0)	Экспоненциальный (1024)	Экспоненциальный (1,0)	Бесконечность	ZR
	ZC	постоянный(1.0)	постоянный (1024)	равномерный (20,21)	Бесконечность	Все ZC и ZR

### Результаты измерений

В данном разделе мы представим результаты, полученные в ходе симуляции. Как уже упоминалось, мы проводили исследования на трех топологиях: звезда, сетка и кластерное дерево, в каждой из которых использовали одинаковое количество ZC, ZR и ZED. Здесь мы рассмотрим различные параметрические результаты (пропускная способность, отправленный и полученный трафик, нагрузка, сквозная задержка), которые иллюстрируют влияние этих параметров на производительность в различных топологиях.

пропускная способность показывает общее количество битов (измеряется в битах в секунду), которые передаются от 802.15.4 MAC к более высоким уровням во всех узлах WPAN-сети.

На графике 4.11 представлены показатели пропускной способности для топологий "Кластерное дерево", "Сетка" и "Звезда" соответственно.

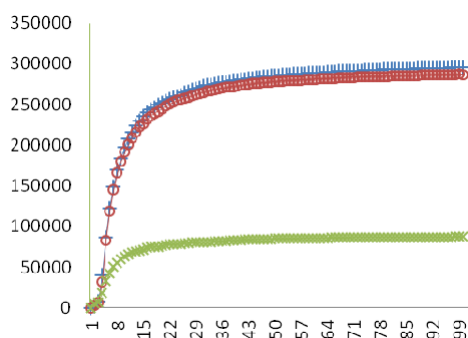




Рисунок 4.11 - Пропускная способность трех топологий (бит/с)

Синий цвет – древообразная  
Красный – сетчатая  
Зеленый – звездообразная

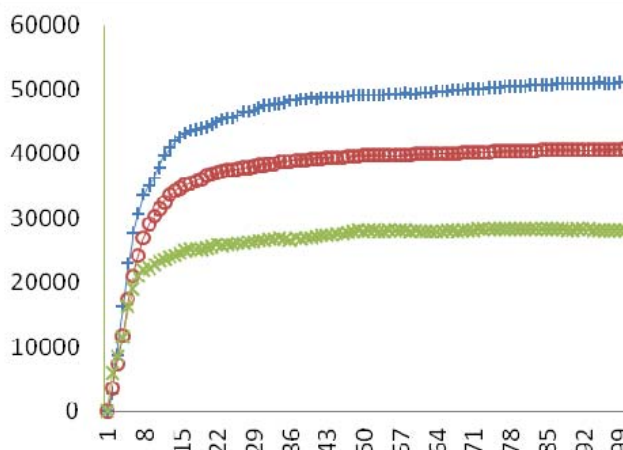


Рисунок 4.12 - Трафик, отправленный для трех топологий (бит/с)

На графике 4.12 видно, что пропускная способность в топологии "Кластерное дерево" достигает 295,632 Кбит/с, в топологии "Сетка" - 287,046 Кбит/с, а в "Звездной" топологии - всего 87,046 Кбит/с. Эти данные свидетельствуют о том, что наивысшая пропускная способность достигается в топологии "Кластерное дерево". Это связано с тем, что в этой топологии присутствуют четыре полнофункциональных устройства, каждый кластер управляется отдельно маршрутизаторами PAN, а затем интегрируется с координатором PAN, что сокращает количество коллизий и ретрансляций.

График также показывает, что пропускная способность в звездообразной топологии минимальна, поскольку в ней присутствует только один координатор PAN ZC, а все остальные устройства функционируют как конечные устройства ZED. Все ZED общаются через один ZC, что снижает пропускную способность.

Кроме того, в сетчатой топологии все узлы взаимодействуют друг с другом, поэтому связь между ZED не столь эффективна, как связь между ZED и ZC или ZR. В результате, пропускная способность в сетчатой топологии ниже, чем в топологии "Кластерное дерево".

#### Отправленный трафик

Эта метрика представляет собой количество трафика, передаваемого всеми MAC-адресами 802.15.4 в сети, измеряемое в битах в секунду. При подсчете объема переданных пакетов для этой статистики также учитываются заголовки пакетов на физическом уровне и уровне MAC. В эту статистику входит весь трафик, отправляемый MAC посредством CSMA-CA. Она не включает управляющий трафик и не учитывает подтверждения (ACK).

На графике 4.12 отображается отправленный трафик для всех рассматриваемых топологий. Для топологии "Кластерное дерево" объем отправленного трафика составляет 51,083 Кбит/с, для "Сетки" - 40,732 Кбит/с, а для "Звезды" - 28,186 Кбит/с. Эти данные свидетельствуют о том, что наибольший объем отправленного трафика приходится на топологию "Кластерное дерево". Это можно объяснить тем, что в этой топологии используются ZC и ZR, управляющие собственными таблицами маршрутизации, что повышает объем генерируемого трафика. Меньшее количество коллизий и потерянных пакетов в топологии "Кластерное дерево" также способствуют увеличению объема отправленного трафика.

График также показывает, что в звездообразной топологии объем отправленного трафика минимален, что объясняется наличием только одного ZC и большим количеством коллизий и ретрансляций.

Полученный трафик:

Эта статистика отображает общий объем трафика, который был успешно получен MAC с физического уровня, измеряемый в битах в секунду. Это включает в себя и ретранслированный трафик.

График 4.13 иллюстрирует полученный трафик для всех рассматриваемых топологий. Для топологии "Кластерное дерево" объем полученного трафика составляет 631,428 Кбит/с, для "Сетки" - 501,736 Кбит/с, а для "Звезды" - 351,460 Кбит/с. Эти данные указывают на то, что наибольший объем полученного трафика приходится на топологию "Кластерное дерево". Это можно объяснить тем, что в этой топологии конечные устройства (ZED) общаются через координаторы (ZC) и маршрутизаторы (ZR), что снижает количество коллизий и потерянных пакетов, и как следствие, увеличивает объем полученного трафика.

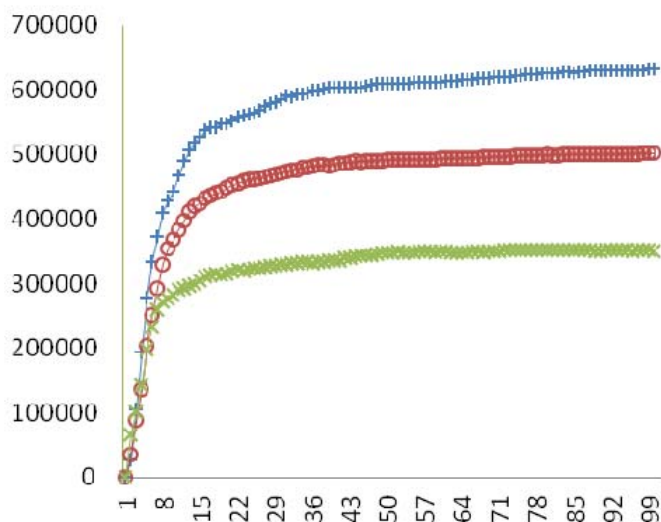


Рисунок 4.13 - Полученный трафик для трех топологий(бит/сек)

Эти данные также подтверждают, что наименьший объем полученного трафика отмечен для звездообразной топологии. Это обусловлено тем, что все устройства в этой схеме соединены через один координатор (ZC), что ведет к

учащению коллизий и большому количеству отброшенных пакетов, снижая тем самым объем трафика. Схожая ситуация наблюдается и в сетчатой топологии, но там несколько конечных устройств (ZED) могут напрямую взаимодействовать с координатором (ZC)

График 4.14 отображает общую загрузку (в бит/с), которую более высокие уровни передают на 802.15.4 MAC во всех узлах WPAN-сети. В случае топологии кластерного дерева нагрузка достигает 45,351 Кбит/с, для сетчатой топологии - 36,218 Кбит/с, а для звездообразной - 25,006 Кбит/с. Эти данные подтверждают, что наибольшая нагрузка наблюдается в кластерной топологии.

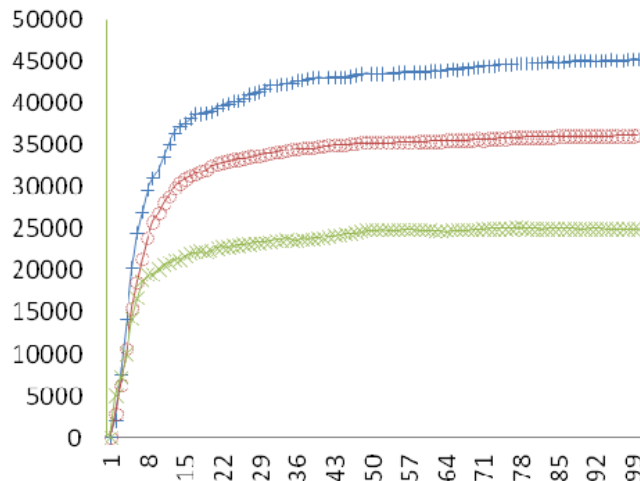


Рисунок 4.14 - Нагрузка для трех топологий (бит/с).

График 4.15 отражает общее время задержки, связанное с очередностью и конфликтами передачи данных в MAC-адрес 802.15.4. Задержка для каждого пакета определяется как промежуток времени от момента его помещения в очередь на отправку (время поступления для данных более высокого уровня или время создания для всех остальных типов пакетов) до момента первичной передачи на физический уровень.

Согласно графику, задержка доступа к среде составляет 0,01159 сек для топологии кластерного дерева, 0,01313 сек для сетчатой топологии и 0,01433 сек для звездообразной топологии. Это демонстрирует, что минимальная задержка доступа к среде наблюдается в кластерной топологии, в то время как максимальная - в звездообразной.

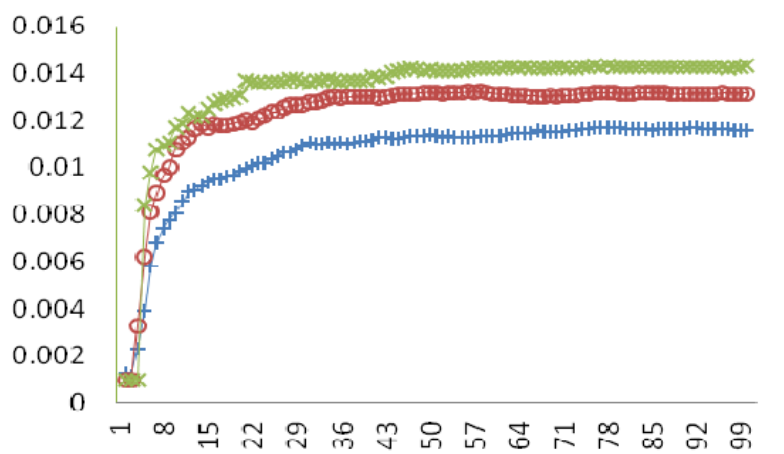


Рисунок 4.15 - Задержка доступа к среде для трех топологий(сек)

#### 4.6 Подробные расчеты и результаты

##### Выводы

Проведен детальный анализ производительности WPAN ZigBee IEEE 802.15.4 в контексте трех различных топологий: Cluster-Tree, Mesh и Star. Параметры, такие как пропускная способность, отправленный и полученный трафик, а также задержка загрузки и доступа к мультимедиа, использовались для оценки эффективности этих топологий WPAN. Такого рода анализ не часто встречается в литературе, и он представляет ценность для понимания и реализации сети 802.15.4. Обобщенные результаты этого анализа приведены в таблице 4.4

Таблица 4.4 Обобщенные результаты анализа

<u>Сравнения</u>	<u>дерево</u>	<u>сеть</u>	<u>звезда</u>
Пропускная способность(Кбит/с)	295.632	287.046	87.046
Отправленный трафик (Кбит/с)	51.083	40.732	28.186
Полученный трафик (Кбит/с)	631.428	501.736	351.460
Нагрузка (Кбит/с)	45.315	36.218	25.006
Задержка (сек)	0.01159	0.01313	0.01433

На основании анализа и обобщенных результатов, представленных в таблице 4.4, можно сделать вывод, что среди топологий WPAN ZigBee 802.15.4 наиболее выгодной и эффективной является древообразная топология в сравнении с звездообразной и сетчатой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках дипломной работы был проведен детальный анализ сенсорных сетей и их применения в различных сферах промышленности и повседневной жизни. Основные принципы функционирования, архитектура, протоколы связи, а также специфические особенности и проблемы сенсорных сетей были рассмотрены в деталях.

Также был проведен анализ основных технологий и стандартов, применяемых в сенсорных сетях, включая ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi и другие. Это позволило определить их преимущества и недостатки, а также особенности применения в зависимости от конкретных задач и условий.

Были проведены анализ и моделирование трех топологий ZigBee сетей с помощью программного обеспечения «OPNET Modeler 14,5» предназначенного для моделирования беспроводных сенсорных сетей. Исследование позволило выявить наиболее эффективную топологию для заданных условий.

Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы при проектировании и внедрении систем на основе сенсорных сетей в различных областях, включая промышленность и бытовые условия

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранова Е. IEEE 802.15.4 и его программная надстройка ZigBee. – Телемультимедиа. [http://book.itep.ru/depositary/zigbee/soft\\_overhead\\_ZigBee.htm](http://book.itep.ru/depositary/zigbee/soft_overhead_ZigBee.htm).
2. Калачев А. Для мобильных стражей: беспроводной стандарт Bluetooth Low Energy в системах безопасности. – Новости электроники, 2013, № 1.
3. Мальцев П.П., Пономарев К.М., Степанов Ю.И. «Умная пыль» на основе микросистемной техники. – Микросистемная техника, 2000, № 4, с. 40-45.
4. Панфилов Д., Соколов М. Введение в беспроводную технологию ZigBee стандарта 802.15.4. – Электронные компоненты, 2004, № 12, с. 73-79.
5. Пушкарев О. ZigBee-модули XBee Series 2 с поддержкой Mesh-топологии. – Новости электроники, 2007, № 16.
6. Смирнова И.В., Жилияков А.Г. «Сенсорные сети: принципы построения и применения». М.: БХВ-Петербург, 2016.
7. Миронов В.В. «Технология беспроводных сенсорных сетей». М.: Энергоатомиздат, 2017.
8. Белоглазов Д.И., Стародубцев В.К. «Стандарты и технологии беспроводных сенсорных сетей». М.: БХВ-Петербург, 2018.
9. Попов С.А. «Беспроводные сенсорные сети и Интернет вещей». М.: ДМК Пресс, 2017.
10. Брагин В.А., Кирсанов В.Б., Морозов В.В. «Применение технологий сенсорных сетей в промышленности». М.: Техника, 2018.
11. Шнурков Л.Е., Голубев А.И. «Сенсорные сети в системах автоматизации». М.: Машиностроение, 2019.
12. Гаврилов А.П. «Современные технологии беспроводной связи и интернет вещей». М.: Стандартизация и метрология, 2019.
13. Климов С.В. «Сенсорные сети: принцип и архитектура». М.: БИНОМ, 2020.

## РЕЦЕНЗИЯ

На дипломную работу

Тлепиев Арман Арыстанович

специальность 6В07112 – Electronic and Electrical Engineering

На тему: «Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей»

Выполнено:

- а) теоретическая часть на 21 листах
- б) практическая часть на 15 листах

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Структура дипломной работы включает в себя: введение, три основных раздела, заключение, список использованной литературы.

В первом разделе определена актуальность и перспективы беспроводных сенсорных сетей.

Во втором разделе подробно описаны и сравнены различные технологии сенсорных сетей.

В третьем разделе проведена симуляция и моделирование ZigBee сети и проведены расчёты.

Общие требования к составлению, изложению, оформлению и содержанию текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с ГОСТ.

## Оценка работы

Студент показал хорошее знание теоретического материала, работа выполнена согласно заданию к ДР, соблюдены все стандарты университета по написанию дипломных работ.

Считаю, что дипломная работа выполнена на отлично (А,95%), а дипломант, Тлепиев Арман, заслуживает присвоения академической степени бакалавра 6В07112 – Electronic and Electrical Engineering.

Рецензент  
Директор  
«ARNAU ENERGY» ЖШС

«1» «06» 2023г.



Баймухамед Т.С.





**ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на дипломную работу

(наименование вида работы)

Тлепиев Арман Арыстанович

(Ф.И.О. обучающегося)

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

(шифр и наименование специальности)

Тема: «Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей»

Структура дипломной работы включает в себя: введение, три основных раздела, заключение, список использованной литературы.

В первом разделе определена актуальность и перспективы беспроводных сенсорных сетей. Во втором разделе подробно описаны и сравнены различные технологии сенсорных сетей. В третьем разделе проведена симуляция и моделирование простейшей ZigBee сети и проведены расчёты.

Общие требования к составлению, изложению, оформлению и содержанию текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с ГОСТ.

В своей дипломной работе студент провёл тщательный анализ прикладных технологий, использующих сенсорные сети. Студент проявил основательность и глубину понимания темы, охватывая как теоретические аспекты, так и прикладные элементы сенсорных сетей.

Таким образом, дипломная работа *Тлепиева Армана Арыстановича* актуальна, отличается значимой практической ценностью и соответствует требованиям образовательной программы “Electronic and Electrical Engineering” – 6B07112, выполнена по всем требованиям ГАК на должном научном уровне. Автор заслуживает оценки «отлично».

**Научный руководитель**

К.т.н. ассоциированный проф.

(должность, уч. степень, звание)

Чечимбаева К.С.

(подпись)

«16» мая 2023г.



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Тлепиев Арман Арыстанович**

**Тақырыбы: Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей**

**Жетекшісі: Сұңғат Марксұлы**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 6.1**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 3.1**

**Дәйексөз (35): 1.1**

**Әріптерді ауыстыру: 3**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 0**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

**2023-06-01**

*Күні*

*Кафедра меңгерушісі*



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Тлепиев Арман Арыстанович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей

**Научный руководитель:** Сұңғат Марксұлы

**Коэффициент Подобия 1:** 6.1

**Коэффициент Подобия 2:** 3.1

**Микропробелы:** 0

**Знаки из здругих алфавитов:** 3

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2023-06-01

*Дата*

*Заведующий кафедрой*



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Тлепиев Арман Арыстанович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Анализ прикладных технологий с использованием сенсорных сетей

**Научный руководитель:** Сұңғат Марқсұлы

**Коэффициент Подобия 1:** 6.1

**Коэффициент Подобия 2:** 3.1

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 3

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2023-06-01

*Дата*

Сұңғат Марқсұлы

  
*проверяющий эксперт*