

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина»  
Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

Факультет РТ

Направление 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

«К защите»

Заведующий кафедрой ТОР

\_\_\_\_\_ Витязев В.В.

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ  
РАБОТА**  
(бакалавриат)  
на тему

**«Построение мобильной радиосети сбора данных»**

Руководитель ОПОП \_\_\_\_\_ (Витязев В.В.)  
(Фамилия И.О.)

Руководитель \_\_\_\_\_ (Бакке А.В.)  
(Фамилия И.О.)

Обучающийся \_\_\_\_\_ (Шувалов М.М.)  
(Фамилия И.О.)

Рязань, 2021 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина»

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

**УТВЕРЖДАЮ**

Зав. кафедрой ТОР  
проф. Витязев В.В. \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ЗАДАНИЕ**

на выпускную квалификационную работу бакалавра

Студенту Шувалову Максиму Михайловичу, учебная группа 719  
(фамилия, имя, отчество № группы)

1. Тема ВКР: «Построение мобильной радиосети сбора данных»
2. Срок представления законченной ВКР к защите: «15» июня 2021 г.
- 3 Научный руководитель Бакке Андрей Васильевич, доцент кафедры ТОР РГРТУ
4. Исходные данные к ВКР: отсутствуют
5. Содержание ВКР: Аннотация; Аргументы применения интеллектуальные сетей для сбора данных. Обзор IoT решений; Анализ радиотехнологий для построения интеллектуальной сети домашней автоматизации; Многоуровневая архитектура сети Z-Wave; Конфигурация сетей Z-Wave; Построение сети Z-Wave; Оценка зоны покрытия радиосети; Заключение; Библиографический список

Дата выдачи задания: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Руководитель ОПОП \_\_\_\_\_ / В.В. Витязев /

Руководитель \_\_\_\_\_ / А.В. Бакке /

Задание принял к исполнению « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021г.

Студент \_\_\_\_\_ / М.М. Шувалов /

## АННОТАЦИЯ

В современном мире идёт активное внедрение интеллектуальных сетей для решения большинства повседневных задач. Одним из главных критериев является минимальное участие человека в работе системы. Для выполнения работы я рассмотрел одно из современных решений – сеть типа «Умный дом», направленная на снижение нагрузки на человека при выполнении бытовых задач. Существует несколько технологий, с помощью которых можно построить такую сеть. Путём сравнительного анализа я выбрал технологию Z-Wave.

Целью моей работы является разработка и построение интеллектуальной мобильной сети домашней автоматизации с использованием технологии Z-Wave.

Первый раздел работы отражает важность и актуальность использования мобильных сетей сбора данных, требования к таким сетям, а также возможные области применения. Во второй части представлена сравнительная характеристика технологий, возможных для построения сети Интернет вещей. Третья глава отражает многоуровневую архитектуру технологии Z-Wave с подробным анализом физического уровня. Четвёртый раздел знакомит с видами устройств Z-Wave и их взаимодействием друг с другом. В пятом разделе я привёл один из способов разработки Z-Wave устройств, а именно Z-Uno и RaZberry. В заключительной части работы я произвёл оценку зоны покрытия данной сети.

Работа состоит из аннотации, содержания, 6 разделов, заключения, библиографического списка и перечня условных сокращений. Также в работе присутствуют 8 таблиц и 33 рисунка.

## ANNOTATION

In the modern world, there is an active introduction of smart grids to solve most of the daily tasks. One of the main criteria is the minimum human participation in the work of the system. To do the work, I looked at one of the modern solutions - a network of the "Smart House" type, aimed at reducing the load on a person when performing everyday tasks. There are several technologies that can be used to build such a network. Through comparative analysis, I chose Z-Wave technology.

The purpose of my work is to design and build an intelligent mobile home automation network using Z-Wave technology.

The first section of the work reflects the importance and relevance of the use of mobile data collection networks, the requirements for such networks, as well as possible areas of application. The second part presents a comparative characteristic of the technologies that are possible for building the Internet of Things. The third chapter reflects the layered architecture of Z-Wave technology with a detailed analysis of the physical layer. The fourth section introduces the types of Z-Wave devices and their interaction with each other. In the fifth section, I gave one of the ways to develop Z-Wave devices, namely Z-Uno and RaZberry. In the final part of the work, I made an assessment of the coverage area of this network.

The work consists of an annotation, content, 6 sections, conclusion, bibliography and a list of abbreviations. Also in the work there are 8 tables and 33 figures.

## СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения.....	6
1. Аргументы применения интеллектуальных сетей для сбора данных. Обзор IoT решений.....	7
2. Анализ радиотехнологий для построения интеллектуальной сети домашней автоматизации.....	8
2.1. Введение. Общие понятия в сети IoT .....	8
2.2. Технология Wi-Fi.....	9
2.3. Bluetooth Low Energy .....	10
2.4. Платформа Z-Wave .....	11
2.5. ZigBee .....	12
2.6. Сводная таблица характеристик.....	13
3. Многоуровневая архитектура сети Z-Wave.....	15
3.1. Анализ физического уровня Z-Wave .....	16
3.1.1. Общие сведения.....	16
3.1.2. Технические характеристики приёмо-передатчика .....	18
3.1.3. Формат кадра физического уровня .....	19
4. Конфигурация сетей Z-Wave.....	21
4.1. Виды устройств и идентификация .....	21
4.2. Топология и маршрутизация сети Z-Wave.....	23
4.3. Классы команд Z-Wave .....	25
4.4. Ассоциации.....	28
5. Построение сети Z-Wave .....	30
5.1. Платформа Z-Unio.....	30
5.2. Z-Wave контроллер на базе Raspberry Pi с платой RaZberry .....	32
6. Оценка зоны покрытия радиосети .....	35
6.1. Выбор методики расчёта .....	35
6.2. Оценка зоны покрытия с применением программного обеспечения Radio-WORKS .....	35
6.1. Анализ полученных результатов.....	39
Заключение.....	40
Библиографический список.....	40

## СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЯ

EEPROM – энергонезависимая память

ENR – конечный заголовок

EOF – конец кадра

GPIO – гнездо ввода/вывода

IoT – интернет вещей

NIF – пакет, содержащий информацию об Node ID узла

PHY – физический уровень

PPDU – блок данных физического протокола

PSDU – служебный блок данных физического уровня

SHR – начальный заголовок

SOF – начало кадра

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

## 1. Аргументы применения интеллектуальные сетей для сбора данных. Обзор IoT решений.

В настоящее время всё большую популярность набирают интеллектуальные для сбора данных. Их интеллектуальность заключается в сведении к минимуму участия человека в управлении и контроле сетью. Такие сети получили широкое распространение во многих сферах жизнеобеспечения. Сигнализация, системы видеонаблюдения, дорожные камеры, ночное освещение, всевозможные датчики и сенсоры и прочее – во всех перечисленных системах используется сбор данных без участия человека. Данные устройства образуют так называемый Интернет вещей (IoT).

Существует большое количество IoT решений, каждое из которых предъявляют свои конкретные требования к устройствам [7]. Однако можно выделить несколько общих требований:

- Низкое энергопотребление. Устройства должны питаться от батареек, срок работы без замены – от 2-х лет;
- Минимальная трудоёмкость монтажных работ. Устройства должны легко устанавливаться, заменяться и обслуживаться;
- Низкая стоимость. Так как решений IoT очень много, ценовой показатель очень важен.

В таблице 1.1 я привёл несколько наиболее распространённых решений IoT в различных областях с характерными им требованиями.

Таблица 1.1 Решения IoT

IoT решение	Устройства	Требование
Умный город	Освещение улиц, видеонаблюдение, датчики движения на пешеходных переходах, громкоговорители и пр.	Низкая стоимость
Умный дом	Датчики движения, температуры, света. Сигнализация. Удалённое открытие/закрытие дверей и окон. Контроль расхода воды, газа.	Низкое энергопотребление, простота развёртывания.
Экономия ресурсов	Устройства регулирования воды, температуры и света. Сигнализация утечек воды, газа.	Низкое энергопотребление
Погода	Датчики влажности, скорости ветра и пр.	Общие требования

Транспорт	GPS трекеры, дорожные камеры	Общие требования
-----------	------------------------------	------------------

В своей работе я подробно рассмотрю решение Умный дом.

## 2. Анализ радиотехнологий для построения интеллектуальной сети домашней автоматизации.

### 2.1. Введение. Общие понятия в сети домашней автоматизации.

В настоящее время широкую популярность набирают системы домашней автоматизации, позволяющие выполнять бытовые задачи без участия человека.

Данная система реализуется в отдельной квартире или частном доме. В её функционал должны входить следующие задачи: безопасность, контроль и экономия. Под безопасностью понимается управление замками и сигнализация. Комфорт представляет собой управление освещением, микроклиматом. Экономия подразумевает контроль электроэнергии и расхода воды. Общая схема организации сети домашней автоматизации представлена на рисунке 2.1.



Рис. 2.1 Схема организации сети «умный дом»

Источником команд для «умного дома» может быть как человек, так и интеллектуальная система. Человек может управлять с помощью голоса, пульта управления или телефоном. Работа интеллектуальной системы основана на готовых сценариях и показаниях датчиков.

Система «умный дом» включает в себя 3 типа устройств:



- Контроллер – главное управляющее устройство. Через него поступают команды от пользователя. Контроллер может не иметь интерфейса. Его может заменить или планшет, через который будут поступать команды от пользователя;
- Сенсоры (датчики) – обеспечивают сбор данных об условиях функционирования подсистем жизнеобеспечения;
- Актуаторы (исполнители) – исполнительные устройства, выполняющие команды от контроллера либо от датчиков.

Существует несколько систем, способных реализовать сеть «умный дом». В данной работе я произвёл сравнение самых популярных протоколов домашней автоматизации по наиболее значимым параметрам.

Для выбора протокола необходимо учитывать простоту реализации системы, доступность и совместимость устройств на рынке, дабы иметь возможность расширять сеть в дальнейшем.

Я выделил следующие критерии выбора протокола для реализации сети «умный дом»:

- Низкое энергопотребление;
- Скорость передачи данных;
- Рабочий диапазон частот;
- Топология сети;
- Дальность связи;
- Совместимость.

Среди основных протоколов домашней автоматизации я выбрал следующие: Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, ZigBee, Z-Wave.

## 2.2. Технология Wi-Fi

Технология Wi-Fi на первый взгляд является самой привлекательной технологией. Она базируется на семействе технологий стандарта 802.11xx. Сеть с использованием данной технологией легко строится и дополняется, благодаря топологии Звезда. Увеличения площади покрытия сети можно добиться путём добавление новых точек доступа или ретрансляторов.

Данная технология обеспечивает высокоскоростной обмен большими объёмами данных, откуда вытекает высокое энергопотребление такой сети. Очевидно, что для передачи простых команд управления такая пропускная способность избыточная. Кроме того, устройства на основе Wi-Fi не смогут долго работать от батареи или аккумуляторов.

Как говорилось ранее, топология сети – Звезда. Это является серьёзным недостатком. Выход из строя центрального узла приводит к отказу работы всей системы.

Ещё одним недостатком является рабочий диапазон частот. Wi-Fi работает в диапазоне 2.4 ГГц, однако данную проблему можно решить путём перехода в диапазон 5 ГГц.

Последним недостатком является отсутствие прикладного уровня в модели OSI. Это влечёт за собой отсутствие гарантии штатной совместимости устройств от разных производителей.

Исходя из выше сказанного, делается следующий вывод. Технология Wi-Fi не рекомендуется для реализации сети «Умный дом», кроме случаев, когда требуется надёжное соединение с облаком и не планируется установка новых устройств других стандартов. Структура сети представлена на рис. 2.2.



Рис. 2.2 Сеть «Умный дом с технологией Wi-Fi

### 2.3. Bluetooth Low Energy

Bluetooth относится к стандарту IEEE 802.15.1 и служит для подключения беспроводных периферийных устройств, таких как клавиатуры, мыши, гарнитур, принтеры и прочее. Применение Bluetooth в IoT стало возможным с релизом версии 4.0, которая включает версию Bluetooth Low Energy. Из названия следует, что технология ориентирована на устройства с низким потреблением энергии.

В отличие от классического Bluetooth в BLE соединение устанавливается только при необходимости отправки или получения данных в течение короткого времени. Это позволило значительно снизить энергопотребление. Скорость передачи данных BLE - до 1 МБит/с.

Важным преимуществом является поддержка данной технологии всеми существующими мобильными устройствами. При использовании специального приложения гаджет становится контроллером для интеллектуальной сети. Также данная технология имеет топологию «звезда», что упрощает добавление новых устройств в сеть «умный дом».

Недостатком данной технологии является диапазон частот 2.4 ГГц. В данном диапазоне высокий уровень затухания сигнала, что ограничивает дальность связи. С учётом стен и прочих препятствий радиус действия системы в помещении составляет около 10 м. Кроме того, данный диапазон используется повсеместно всеми бытовыми и промышленными устройствами, что создаёт большое количество помех. Несмотря на доступных на выбор 40 каналов для передачи данных, этот фактор является существенным недостатком при выборе технологии Bluetooth для построения сети «умный дом». Помимо прочего, топология «звезда» не гарантирует высокую отказоустойчивость системы.

Как итог, Bluetooth как технология домашней автоматизации, не имеет перспектив в ближайшие годы.

## 2.4. Платформа Z-Wave

Z-Wave относится к стандарту ITU-T G.9959 и является протоколом беспроводной связи с ультранизким потреблением энергии. Данный стандарт был разработан специально для построения сети «умный дом».

Данная технология использует ячеистую топологию (mesh-сеть) в отличие от Wi-Fi и BLE, что позволяет её узлам ретранслировать сообщения до требуемого адресата. Это решение позволило увеличить радиус покрытия сети, а также повысить отказоустойчивость. При выходе из строя любого узла сети сообщения будут передаваться через ретранслирующие узлы. Маршруты доставки сообщений определены заранее.

Структура сети Z-Wave представлена на рисунке 2.3.

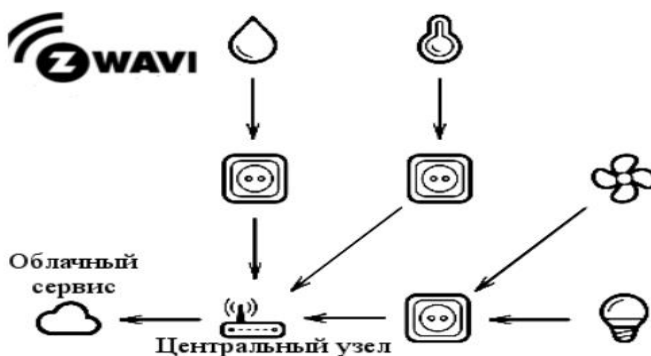


Рис. 2.3 Структура сети Z-Wave

Для построения сети используются следующие виды устройств:

- Основной контроллер – осуществляет добавление новых и удаление ненужных устройств, составляет оптимальные и альтернативные маршруты доставки сообщений, контролирует протоколы автоматизации и выполняет другие процедуры, отвечающие за функционирование сети;
- Модули с питанием от батареи – являются конечными устройствами сети (датчики);
- Модули с постоянным питанием – строят ячеистую топологию сети и обеспечивают передачу данных между контроллером и модулями с питанием от батареи.

Для добавления новых устройств сеть использует QR и пин-коды.

Z-Wave охватывает все уровни модели OSI, что гарантирует полную совместимость с устройствами от разных производителей.

Данная технология работает в диапазоне 800-900 МГц. Это значит, что стены и другие препятствия не оказывают серьёзного мешающего воздействия, как в диапазоне 2.4 ГГц. Кроме того, в данном диапазоне значительно лучше помеховая обстановка, т.к. количество устройств малого радиуса действия, работающих в этом диапазоне, крайне мало.

Недостатком Z-Wave является несовместимость устройств, произведённых в разных странах, т.к. они используют разные частоты.

На основе выше сказанного можно сделать вывод, что использование технологии Z-Wave является наилучшим решением для построения сети домашней автоматизации среди прочих технологий.

## 2.5. ZigBee

Стандарт ZigBee так же, как и Z-Wave был разработан специально для сетей типа «умный дом». ZigBee построен поверх стандарта IEEE 802.15.4 и набор его протоколов определяет только верхние уровни модели OSI.

Технология характеризуется низкой скоростью передачи данных и низким энергопотреблением. Достоинством является возможность вариаций топологий сети: «звезда», «дерево» и mesh-сеть. Варианты топологий приведены на рисунке 2.4.

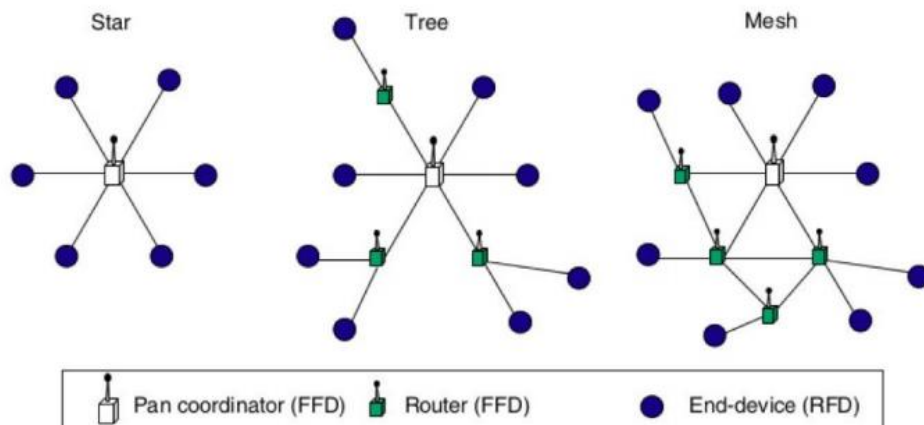


Рис. 2.4 Топологии сети ZigBee

В данной сети 3 типа устройств:

- Координаторы – координируют функционирование сети;
- Маршрутизаторы – осуществляют подключение до 32 оконечных устройств и обеспечивают динамическую маршрутизацию пакетов;
- Оконечные устройства – принимающие и отправляющие пакеты без возможности их ретрансляции.

ZigBee работает в диапазоне частот 2.4 ГГц, откуда вытекают недостатки, присущие данному диапазону и описанные выше.

Также ZigBee проигрывает по энергоэффективности Z-Wave и BLE. Кроме того, технология не гарантирует полной совместимости с устройствами других производителей.

## 2.6. Сводная таблица характеристик

Проведя данный анализ технологий, я составил сводную таблицу характеристик стандартов, используемых для построения сети домашней автоматизации (таблица 2.1).

Таблица 2.1 Сводная таблица характеристик

Технология	Wi-Fi	Bluetooth Low Energy	Z-Wave	ZigBee
Стандарт	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1	ITU-T G.9959	IEEE 802.15.4
Диапазон частот	2.4 ГГц, 5 ГГц	2.4 ГГц	800-900 МГц	2.4 ГГц
Энергопотребление	Высокое	Низкое	Низкое	Низкое
Радиус связи	10-100 м	10 м	10-30 м	10-70 м
Топология сети	Звезда	Звезда	Ячеистая	Ячеистая, дерево, звезда
Совместимость	Не гарантирована из-за отсутствия прикладного уровня модели OSI	Полная совместимость устройств различных производителей	Хорошая совместимость, однако нет совместимости между устройствами, произведёнными в разных странах	Нет гарантии совместимости с устройствами разных производителей
Скорость передачи	300 Мбит/с	1 Мбит/с	10-100 Кбит/с	50-240 Кбит/с

Исходя из данной таблицы можно сделать следующие выводы:

- Wi-Fi не подходит для построения сети домашней автоматизации, несмотря на огромную на фоне других скорость передачи;
- Bluetooth Low Energy обладает наилучшей совместимостью и неплохой скоростью передачи, однако проигрывает по отказоустойчивости;
- Z-Wave обладает хорошими показателями энергопотребления, имеет ячеистую топологию, что гарантирует высокую отказоустойчивость, а также работает в диапазоне 800-900 МГц;
- ZigBee имеет выше скорость, чем Z-Wave, но проигрывает совместимости; также он работает в диапазоне 2.4 ГГц.

### 3. Многоуровневая архитектура сети Z-Wave

Условно можно разделить модель Z-Wave на 3 уровня (рисунок 3.1.):

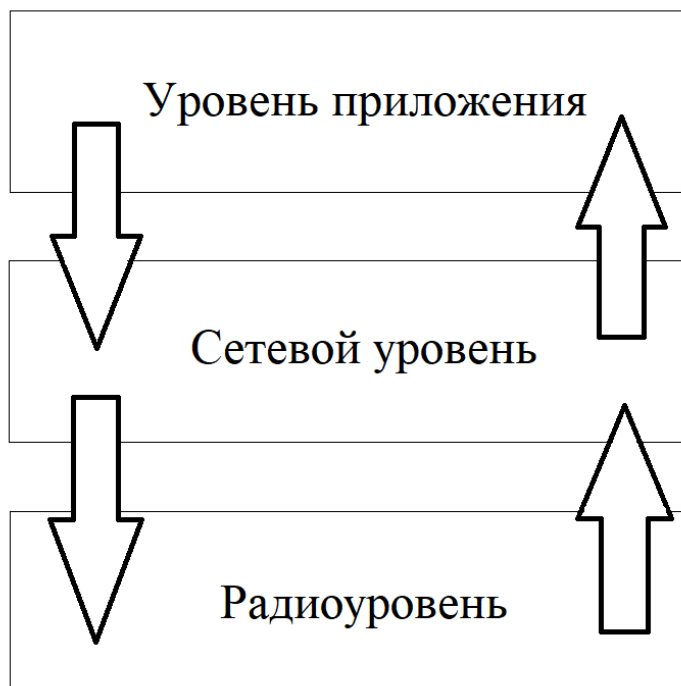


Рис. 3.1. Многоуровневая структура

Уровень приложения определяет какого вида сообщения нужны для управления определённым устройством (датчиком света или выключателем)

Сетевой уровень разделяется на 3 подуровня:

- Уровень управления доступом к среде: МАС-уровень контролирует использование беспроводного оборудования. Его функции невидимы для конечного пользователя и, поэтому, особо не важны для него;
- Транспортный уровень: Эта функция гарантирует, что обмен сообщениями между двумя узлами может быть произведен без ошибок. Конечный пользователь не может повлиять на работу этого уровня, но результаты видимы;
- Уровень маршрутизации: Данный уровень гарантирует, что за счет использования других узлов, если необходимо, сообщение передастся исходным отправителем желаемому получателю. Работа уровня маршрутизации видима конечным пользователем и может быть оптимизирована.

Радиоуровень (физический уровень) включает в себя задачу доставки пакета от передатчика к приёмнику. Сюда входит модуляция/демодуляция, кодирование/декодирование и пр. Физический уровень подробно рассмотрен ниже.

### 3.1. Анализ физического уровня Z-Wave

#### 3.1.1. Общие сведения

Физический уровень определяет вид модуляции, скорость передачи, методы синхронизации и формат кадра для использования в маломощных сетях управления с низкой пропускной способностью.

Физический слой отвечает за решение следующих задач:

- Присвоение радиочастотных профилей физическим каналам;
- Активация и деактивация трансивера;
- Передача и приём;
- Чистая оценка канала;
- Выбор частоты;
- Оценка качества полученных пакетов.

На физическом слое расположены 2 службы:

- 1) Служба данных. Обеспечивает передачу и прием блоков данных физического протокола (Physical Protocol Data Unit, PPDU) по физическому радиоканалу;
- 2) Служба управления.

На физическом уровне происходит вставка исходящих данных в физический формат кадра. При получении кадров входящие данные извлекаются из структуры кадра и пересылаются на верхние уровни.

Данные с верхних уровней передаются на уровень физический уровень (PHY) как служебный блок данных PHY (Physical Service Data Unit, PSDU). PSDU имеет префикс PHY с начальным заголовком (Start Header, SHR). SHR содержит последовательность преамбулы и начало полей кадра (Start of Frame, SOF). Последовательность преамбулы позволяет РЧ-приемнику получить символ синхронизация. Наконец, для некоторых скоростей передачи данных добавляется конечный заголовок (End Header, EHR). SHR, PSDU и EHR вместе образуют PPDU.

Услуги уровня — это возможности, которые он предлагает пользователю на следующем более высоком уровне или подуровне, создавая свои функции на сервисах следующего нижнего слоя. Эта концепция проиллюстрирована на рисунке 3.2, где показана иерархия сервисов и взаимосвязь двух соответствующих N-пользователей и связанного с ними однорангового протокола N-уровня (или подуровня) сущности.



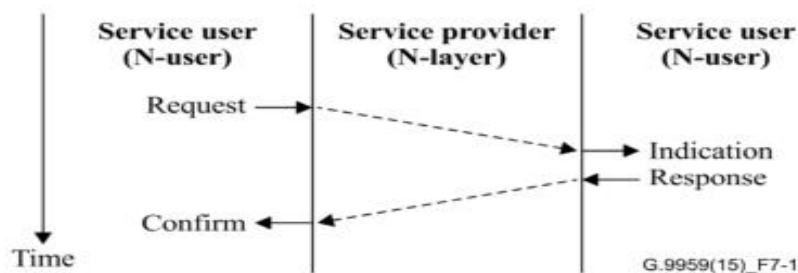


Рис. 3.2 Сервисные примитивы

Услуги определяются путем описания информационного потока между N-пользователем и N-уровнем.

Этот информационный поток моделируется дискретными мгновенными событиями, которые характеризуют предоставление услуги. Каждое событие состоит из передачи примитива службы от одного уровня к другому через точку доступа к услугам (SAP), связанным с N-пользователем. Сервисные примитивы передают требуемую информацию, предоставляя определенную услугу. Эти сервисные примитивы являются абстракцией, потому что в них указывается только предоставляемая услуга, а не способы ее предоставления. Это определение не зависит от любой другой реализации интерфейса.

Сервисы определяются описанием сервисных примитивов и параметров, которые их характеризуют.

Служба может иметь один или несколько связанных примитивов, которые определяют их деятельность. Каждый сервисный примитив может иметь ноль или более параметров, которые передают информацию, необходимую для предоставления услуги.

Примитив может быть одним из четырёх общих типов:

- **Запрос.** Примитив запроса передается от N-пользователя на N-уровень, чтобы запросить услугу;
- **Индикация.** Примитив индикации передается от N-уровня к N-пользователю, чтобы указать внутреннее событие N-уровня, которое важно для N-пользователя. Это событие может быть логически связано с запросом удаленного обслуживания, или он может быть вызван внутренним событием N-уровня;
- **Ответ.** Примитив ответа передается от N-пользователя к N-уровню для завершения процедуры, ранее вызванной примитивом индикации;
- **Подтверждение.** Примитив подтверждения передается от N-уровня к N-пользователю для передачи результатов одного или нескольких связанных предыдущих запросов на обслуживание.

### 3.1.2. Технические характеристики приёмо-передатчика

#### 3.1.2.1. Радиочастотные профили

Радиочастотный профиль определяет центральную частоту и скоростью передачи. Всего в спецификации 33 профиля для разных регионов.

В таблице 3.1 приведены радиочастотные (РЧ) профили для США, России и Китая.

Таблица 3.1. РЧ профили

Профиль	Регион	Центральная частота	R1	R2	R3
4	США	908.42 МГц	X		
5		908.42 МГц		X	X
6		908.42 МГц		X	
28	Россия	869.0 МГц	X		
29		869.0 МГц		X	X
30		869.0 МГц		X	
31	Китай	868.42 МГц	X		
32		868.42 МГц		X	X
33		868.42 МГц		X	

В таблице 3.2 приведены скорости передачи данных.

Таблица 3.2. Скорости передачи

Профиль	Битовая скорость	Символьная скорость
R1	9.6 Кбит/с	19.2 Кбод
R2	40 Кбит/с	40 Кбод
R3	100 Кбит/с	100 Кбод

#### 3.1.2.2. Модуляция и помехоустойчивое кодирование

В зависимости от скорости передачи используются следующие виды модуляции и кодирования (таблица 3.3.):

Таблица 3.3. Модуляция и кодирование

Скорость	Модуляция	Кодирование
R1	FSK	Манчестерский код
R2	FSK	NRZ
R3	GFSK, BT = 0.6	NRZ

### 3.1.2.3. Требования к мощности передатчика

Выходная мощность передатчика должна соответствовать местным нормам. Допустимая норма называется номинальной.

Передатчик должен иметь возможность регулировать уровень мощности с шагом 2 дБ в диапазоне от  $P_n$  до  $P_n - 10$  дБ, где  $P_n$  - номинальная мощность передающего тракта согласно нормам ГКРЧ. В дальнейшем диапазон регулировки мощности будет расширен: от  $P_n$  до  $P_n - 20$  дБ [6].

### 3.1.2.4. Чувствительность приёмника

Чтобы обеспечить минимальный бюджет линии РЧ, приемник должен быть способен принимать стандартный тестовый кадр на минимальном уровне мощности.

В таблице 3.4 представлены требования к чувствительности приёмника в зависимости от скорости передачи.

Таблица 3.4. Чувствительность приёмника

Скорость	Чувствительность
R1	-95 дБм
R2	-92 дБм
R3	-89 дБм

### 3.1.3. Формат кадра физического уровня

Общая структура кадра показана на рисунке 3.3.

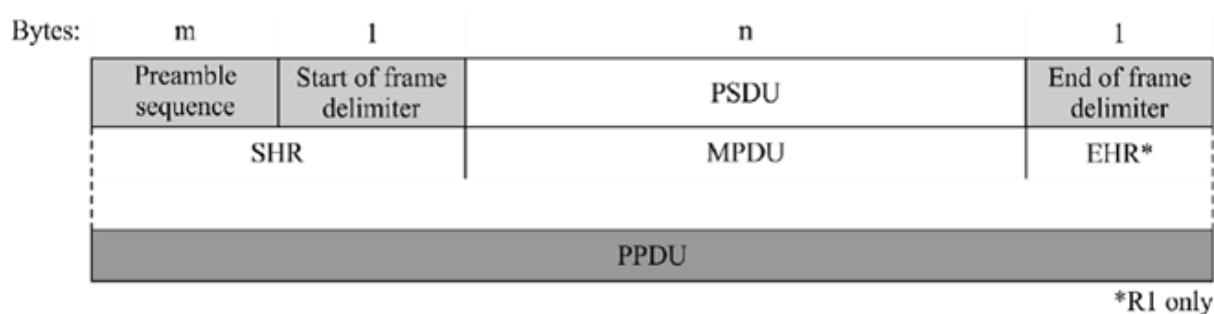


Рис. 3.3 Структура кадра физического уровня

#### 1) Поле преамбулы

Поле преамбулы позволяет получателю получить символьную синхронизацию. Поле преамбулы состоит из последовательности байтов, содержащей двоичный шаблон «01010101». Рисунок 3.4 показывает форму шаблона преамбулы, закодированную в манчестерском коде, для скорости передачи данных R1.

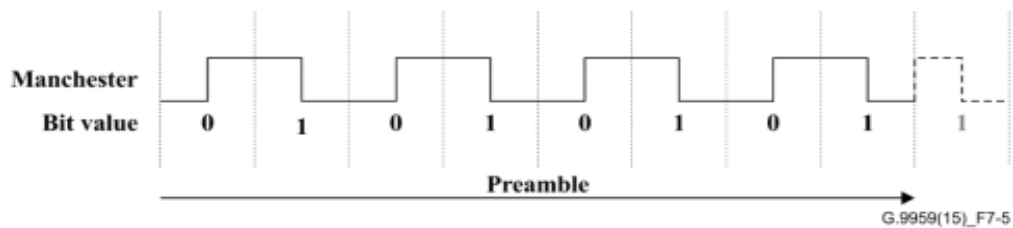


Рис. 3.4 Преамбула для скорости R1

## 2) Поле начала кадра

SOF – это 8-битное поле, завершающее преамбулу и начинающее поле PSDU. SOF формируется согласно шаблону, представленному в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Формирование поля SOF

Номер бита	7	6	5	4	3	2	1	0
Значение	1	1	1	1	0	0	0	0

## 3) Поле данных Physical Service Data Unit (PSDU)

Поле PSDU имеет переменную длину и содержит пакеты физического уровня.

## 4) Поле конца кадра (End of Frame, EOF)

Поле разделителя EOF должно отправляться только при передаче со скоростью R1. Поле должно иметь последовательность из 8 нарушений Манчестерского кода, каждое из которых обозначено E. Каждое нарушение E должно быть символом без перехода (рисунок 3.5).

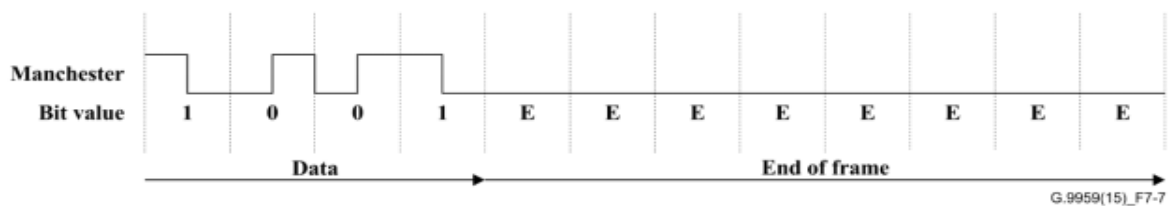


Рис. 3.5 Формирование поля EOF



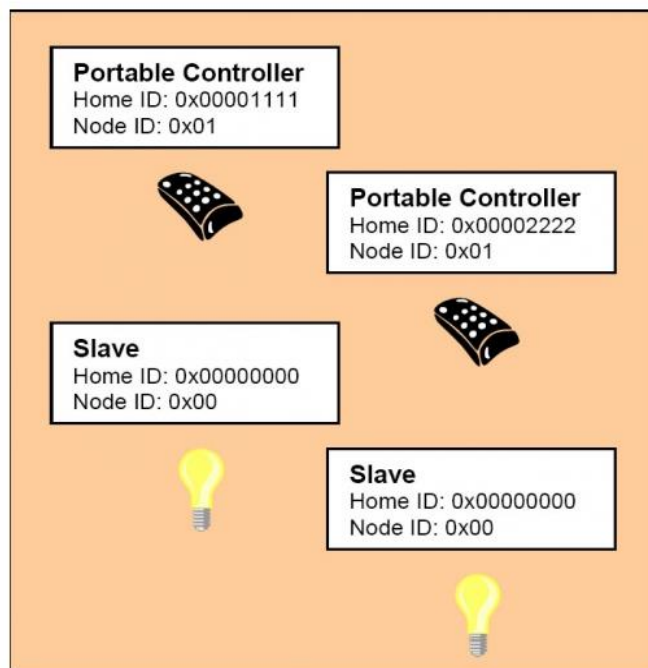


Рис. 4.2 Z-Wave устройства до включения в сеть

На данном рисунке видно 2 контроллера и 2 узла. На данном этапе узлы неподчинены ни одному из контроллеров, о чём свидетельствует отсутствие Home ID и Node ID.

Предположим, что главным стал контроллер с Home ID 0x00001111. Тогда картина меняется следующим образом (рисунок 4.3).

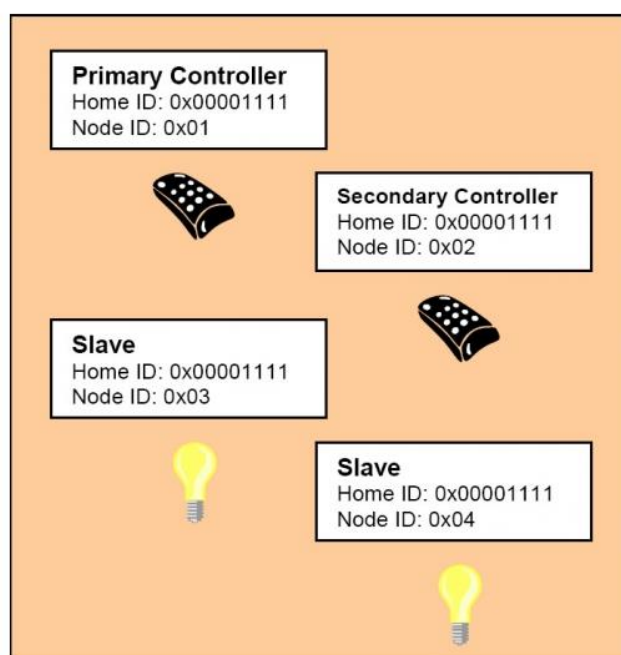


Рис. 4.3 Z-Wave после включения

Главный контроллер передал свой Home ID другим устройствам, в том числе и второму контроллеру, а также назначил им уникальные Node ID. В этом случае оба узла находятся в подчинении первого контроллера.

Размерность Home ID составляет 32 бита, что означает возможность построения до 4 млрд различных Z-Wave сетей. При этом каждая сеть может включать до 256 различных модулей.

Если требуется удалить устройство из Z-Wave сети, то контроллер стирает из устройства Home ID и Node ID. Такой процесс называется исключением. После этого устройство возвращается к заводским настройкам.

## 4.2. Топология и маршрутизация сети Z-Wave

Для сети домашней автоматизации очень полезна возможность маршрутизации.

На рисунке 4.4 показана сеть без маршрутизации.

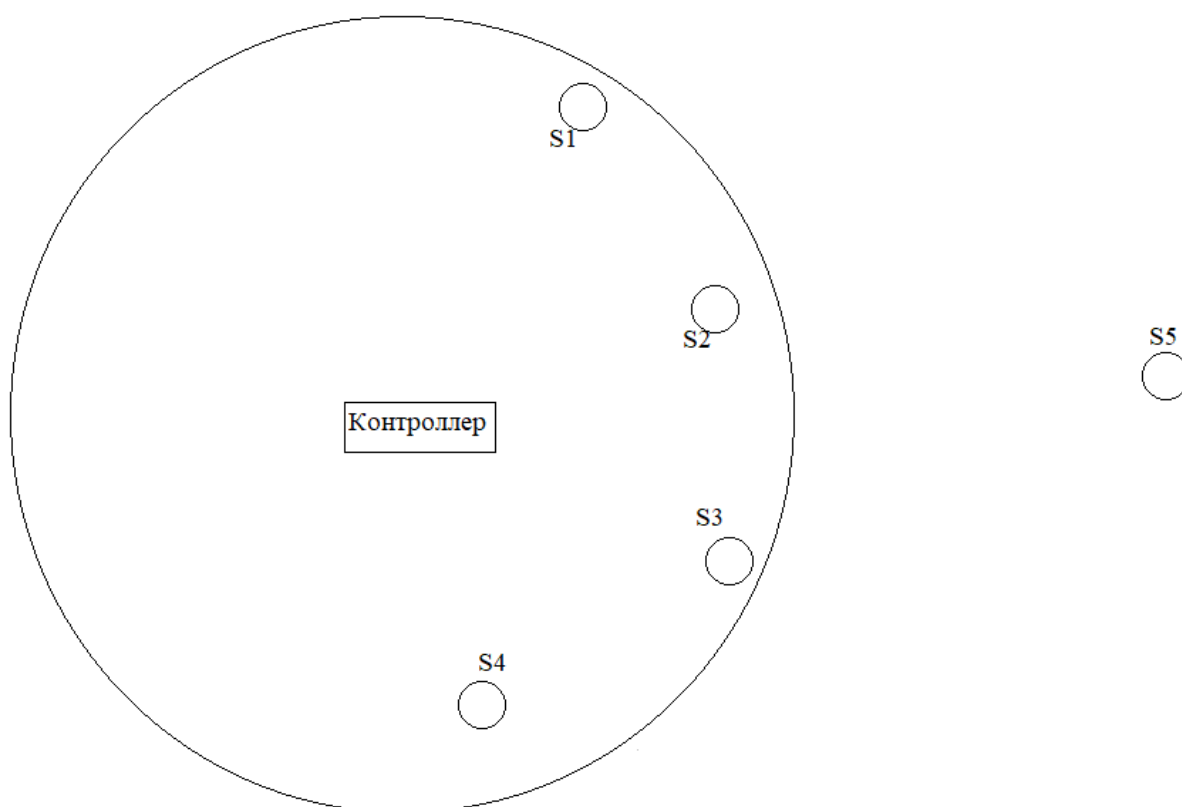


Рис. 4.4 Сеть без маршрутизации

Устройства S1 – S4 находятся внутри зоны покрытия контроллера, однако ширины зоны не хватает для связи с узлом S5. Для решения данной проблемы технология Z-Wave использует ячеистую топологию сети (mesh-сеть). Она подразумевает ретрансляцию сообщений через соседние узлы. Даже если какой-либо из узлов вы-

ходит из строя, сообщение можно доставить по другому маршруту. На рисунке 5 изображена ячеистая топология сети.

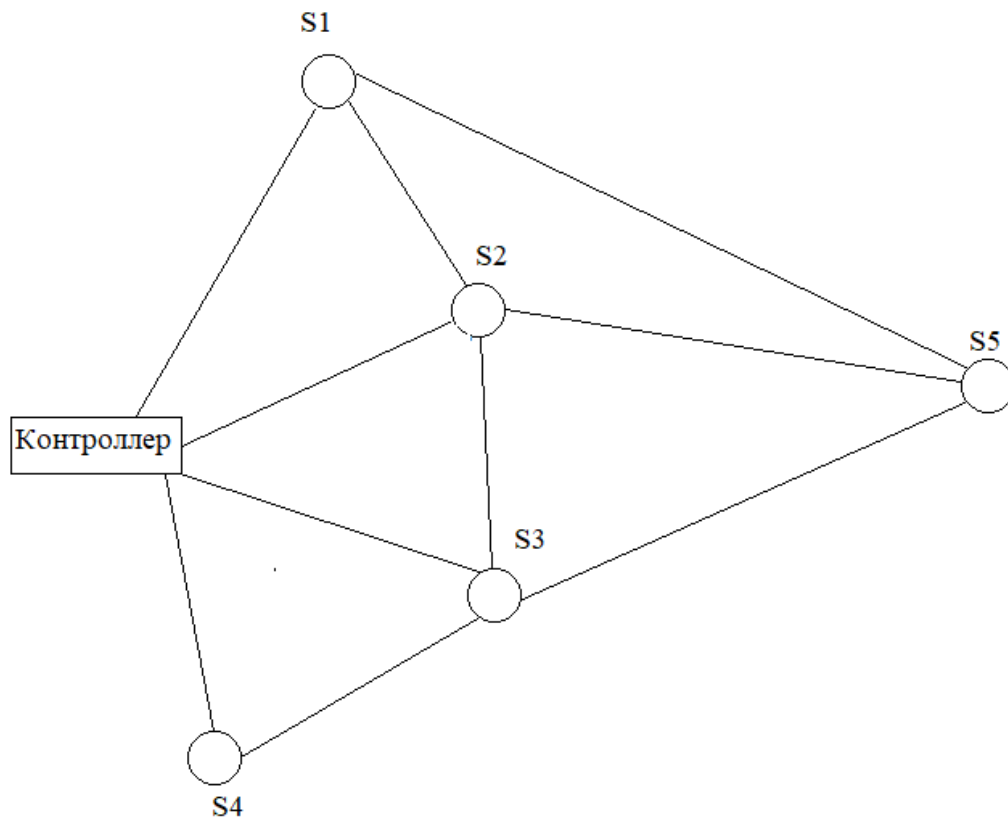


Рис. 4.5 Ячеистая сеть

В данной сети существует прямая связь между контроллером и узлами S1 – S4. Между контроллером и узлом S5 нет прямого соединения, связь будет произведена через узлы S1, S2 или S3.

Любой узел способен определить, какие из узлов являются соседними. Во время процесса включения узел сообщает контроллеру о своих соседях. Контроллер, в свою очередь используя данную информацию, формирует таблицу, отражающую возможные маршруты доставки сообщений.

Пример такой таблицы представлен ниже (таблица 4.1).

Таблица 4.1 Таблица маршрутов

Node ID	Контроллер	to S1	to S2	to S3	to S4	to S5
Контроллер	X	1	1	1	1	0
S1	1	X	1	0	0	1
S2	1	1	X	1	0	1
S3	1	0	1	X	1	1
S4	1	0	0	1	X	0
S5	0	1	1	1	0	X



1 – узлы являются соседями; 0 – не являются соседями.

К примеру, чтобы передать информацию от контроллера до узла S5, возможен следующий маршрут: Контроллер – S2 – S5. Это один из нескольких возможных маршрутов. Контроллер сам решит, какой из маршрутов оптимальный. Только при условии, что все маршруты не будут работать, контроллер выдаст ошибку.

### 4.3. Классы команд Z-Wave

Все сообщения Z-Wave можно классифицировать следующим образом:

По типу команды:

- GET (запрос). Данное сообщение отправляется контроллером к узлу, для запроса отчёта. В ответ узел отправляет данные в числовой форме;
- SET (команда). Команда отправляется контроллером к узлу для установления значения некоторого параметра. (Пример: включение или выключение света). В ответ узел отправляет подтверждение;
- REPORT (отчёт). Отчёт отправляется по инициативе узла в ответ на запрос GET, а также как сигнализация при срабатывании датчика или важном изменении его показателя.

По типу адресации:

- Singlecast – команда от одного конкретного модуля к другому конкретному модулю. Подвергается маршрутизации и требует подтверждения. Такое сообщение показано на рисунке 6.

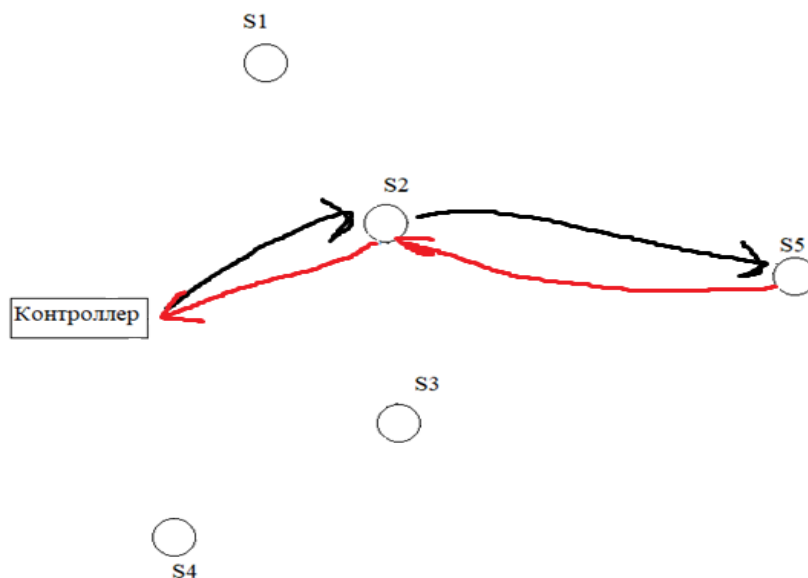


Рис. 4.6 Сообщение Singlecast

- Multicast – команда от одного контроллера/модуля к нескольким модулям, находящимся в прямой видимости. Не требует маршрутизации и подтверждения. Данная команда отправляется при использовании ассоциации. Пример отправки на рисунке 7.

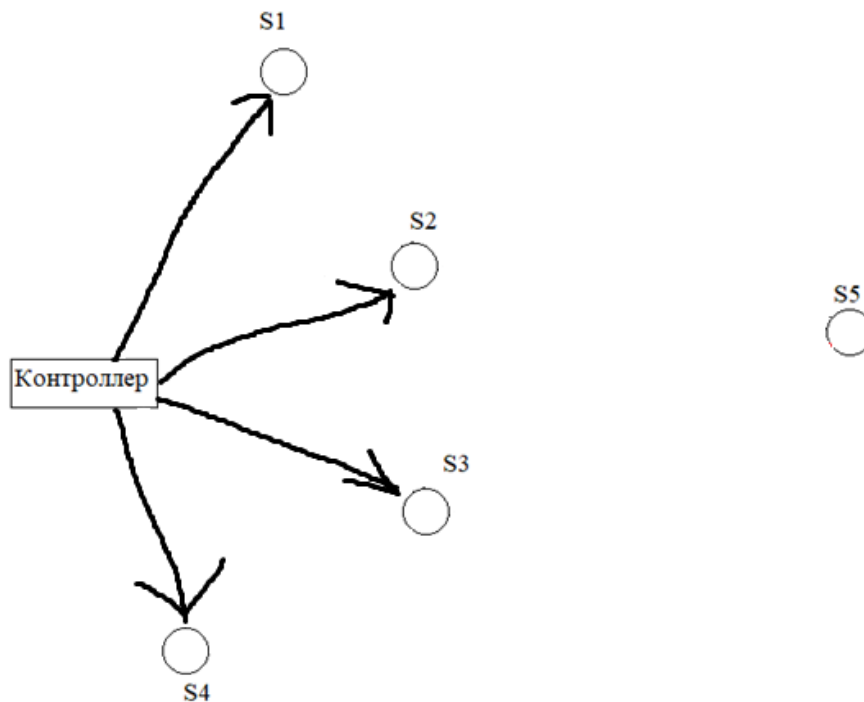


Рис. 4.7 Сообщение Multicast

- Broadcast – команда абсолютно всем модулям, очень редко используется. Пример на рисунке 8.

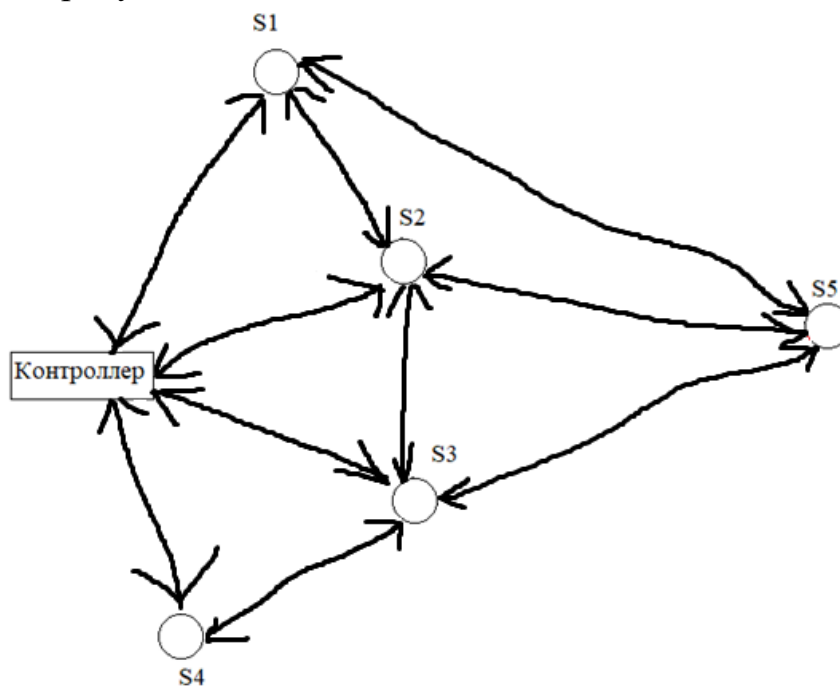


Рис. 4.8 Сообщение Broadcast

### Базовый класс команд Z-Wave

Каждое Z-Wave устройство должно обладать определённым минимумом команд. Такой минимум называется Базовым классом. Набор команд основного класса строится на трёх вышеописанных командах: GET, SET, REPORT.

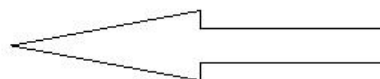
В зависимости от типа устройства Базовый класс будет интерпретироваться по-разному. К примеру, исполнение команд Базового класса датчиком температуры будет отличаться от исполнения выключателем.

На рисунке 4.9 показана разная интерпретация одной и той же базовой команды GET.

Переключатель  
отправит  
REPORT о  
своём текущем  
состоянии  
(Вкл./выкл.)



Поступает команда GET



Датчик  
температуры  
сообщит текущий  
показатель  
температуры  
окружающей  
среды



Поступает команда GET



Розетка передаст  
информацию о  
текущем  
напряжении



Поступает команда GET



Рис. 4.9 Базовая команда GET

## 4.4. Ассоциации

В сети Z-Wave «общение» между устройствами может осуществляться двумя способами: через контроллер или напрямую (рисунок 4.10).

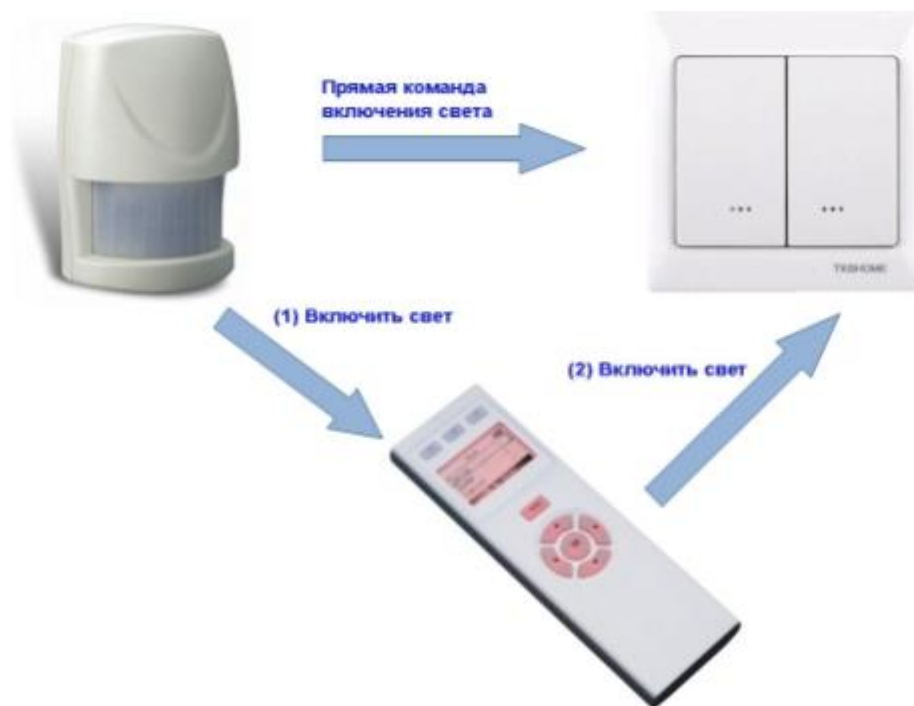


Рис. 4.10 Две формы ассоциации

Передача сообщения через контроллер занимает больше времени, а также появятся дополнительные ошибки. Кроме того, контроллер должен находиться в режиме прослушивания.

Быстрее и проще отправлять данные напрямую датчика к исполняемому модулю. Однако для этого отправляющий узел должен иметь информацию о маршрутах, поэтому только маршрутизируемые устройства могут использовать ассоциацию. Также для установления связи отправляющее устройство должно знать Node ID принимающего.

Существует 2 способа установления ассоциации.

### 1. Прямая ассоциация.

Источник сообщения переводится в состояние ассоциации путём нажатия соответствующей кнопки. Принимающий узел, отправляя Multicast сообщение (прямым соседям), сообщает сведения о себе. Эти сведения называются Node Information Frame (NIF). Узел-источник запоминает NIF и сохраняет ассоциацию. Данная процедура показана на рисунке 4.11.

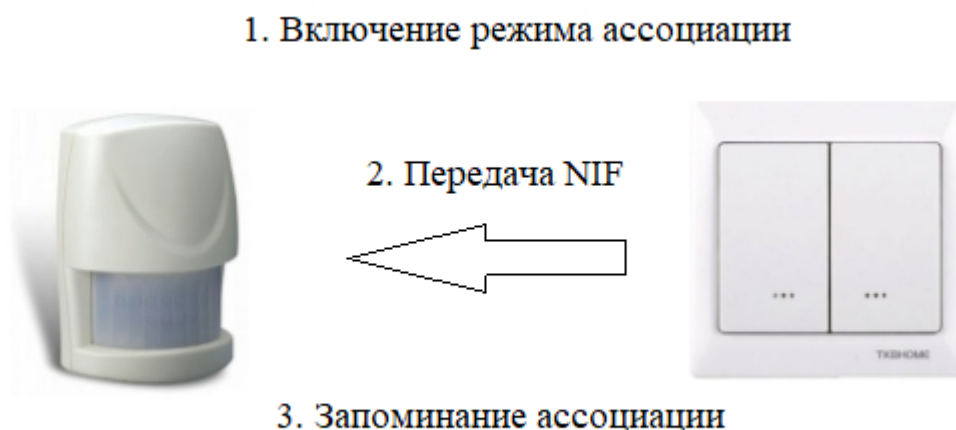


Рис. 4.11 Прямая ассоциация

## 2. Назначаемая ассоциация.

Данным способом можно ассоциировать 2 устройства, не являющихся прямыми соседями. Для этого используют дополнительный контроллер с картой маршрутов.

На первом этапе подключаемый контроллер переводится в режим ассоциации. После этого контроллер располагается вблизи узла-отправителя и получает от него NIF, затем то же самое проделывается с узлом-получателем. На последнем шаге контроллер информирует отправителя об успешной ассоциации и сообщает ему маршрут доставки. На рисунке 4.12 показан такой вид ассоциации.



Рис. 4.12 Назначаемая ассоциация

## 5. Построение сети Z-Wave

В данном разделе я привёл одно из возможных решений для построения сети «Умный дом» на базе Z-Wave.

### 5.1. Платформа Z-Uno[1]

Z-Uno сочетает в себе универсальность и простоту. С помощью такой платы можно создавать большое количество устройств: всевозможные датчики, переключатели, счётчики и прочее.

Что из себя представляет Z-Uno? Это плата, основанная на чипе ZM5101 (также возможны варианты на платах WML-C84 и WML-C85 от Mitsumi). На рисунке 5.1 представлен один из вариантов платы Z-Uno.



Рис. 5.1 Плата Z-Uno

Технические характеристики Z-Uno:

- Flash-память – 28 кБайт;
- Оперативная память RAM – 4 кБайт;
- Радиопередатчик на каналах с 9.6 кБит/с, 40 кБит/с и 100 кБит/с;
- 22 гнезда ввода-вывода (general-purpose input/output, GPIO);
- 4 аналогово-цифровых преобразователя (АЦП);
- USB порт для питания 5 В;
- Энергонезависимая память Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM) – 64 кБайт;
- 1 шина SPI;
- ИК-контроллер – 4, ИК-приёмник с функцией обучения – 1;
- 1 контроллер для диммирования;
- 2 таймера;
- 1 шина I2C;
- Двухнаправленная низкоскоростная шина 1-wire.

На рисунке 5.2 показана распиновка платы Z-Uno.

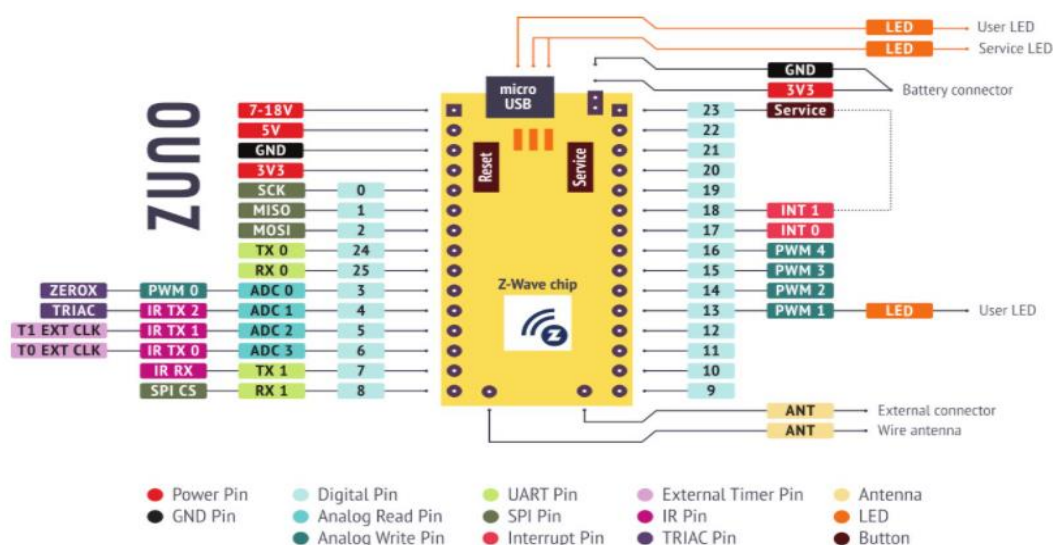


Рис. 5.2 Распиновка Z-Uno

Программирование Z-Uno осуществляется в среде Arduino IDE на языке C. Код загружается в плату через USB.

На рисунке 5.3 показана среда разработки Arduino IDE с примером кода для датчика движения.

```

MotionSensor | Arduino 1.6.5
Файл Правка Эскиз Инструменты Помощь

MotionSensor $

// встроенный светодиодный номер
#define LED_PIN 13

//вывод для триггера движения
#define MOTION_PIN 12

// номер канала
#define ZUNO_CHANNEL_NUMBER_ONE 1

// следующий макрос устанавливает каналы Z-Uno
// в этом примере я настраиваю один двоичный канал датчика
ZUNO_SETUP_CHANNELS(ZUNO_SENSOR_BINARY(ZUNO_SENSOR_BINARY_TYPE_MOTION, getter));

// переменная для текущего состояния движения
byte lastSensorValue = 0;

void setup(){
  //включение печати по USB
  Serial.begin();
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT); // установка вывода светодиода
  pinMode(MOTION_PIN, INPUT); // установка вывода датчика движения как вход
}

void loop(){
  // образец текущего состояния движения
  byte currentSensorValue = digitalRead(MOTION_PIN);

  if (currentSensorValue != lastSensorValue) { // если состояние движения изменилось
    lastSensorValue = currentSensorValue; // сохранить новое состояние
    zunoSendReport(ZUNO_CHANNEL_NUMBER_ONE); // отправить ответ контроллеру Z-Wave
    if (currentSensorValue == HIGH){ // если есть движение
      Serial.println("Motion detected"); // отправить сообщение по USB
      digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // включить светодиод
    } else { // если движение закончилось
      Serial.println("Motion stopped"); // отправить сообщение по USB
      digitalWrite(LED_PIN, LOW); // выключить светодиод
    }
  }
}

// функция, которая возвращает ранее сохраненное состояние кнопки
// функция запускается только по требованию контроллера
byte getter(){
  if (lastSensorValue == 1) { // если обнаружено движение
    return 0xff; // вернуть контроллеру состояние "Запущено"
  } else { // если движение закончилось
    return 0; // вернуть контроллеру состояние "Ожидание"
  }
}

```

Рис. 5.3 Программирование Z-Uno



После этого данный код загружается в плату через порт USB нажатием кнопки вгрузить (рисунок 5.4).

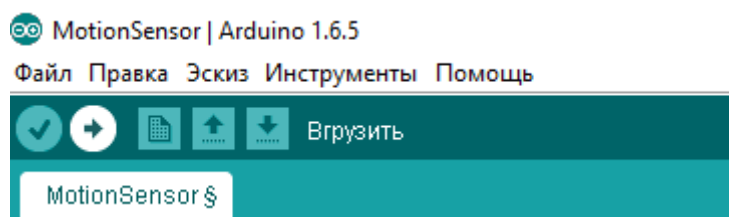


Рис. 5.4 Загрузка кода в плату

Всю остальную работу по передаче данных на себя берёт плата Z-Uno.

## 5.2. Z-Wave контроллер на базе Raspberry Pi с расширяющей платой RaZberry[2]

Raspberry Pi представляет собой одноплатный компьютер размером с банковскую карту. Расширяющая плата от Z-Wave.me позволила превратить такой мини-компьютер в полноценный контроллер для сети домашней автоматизации. На рисунках 5.5 и 5.6 показаны плата компьютера Raspberry Pi и расширяющая плата RaZberry.

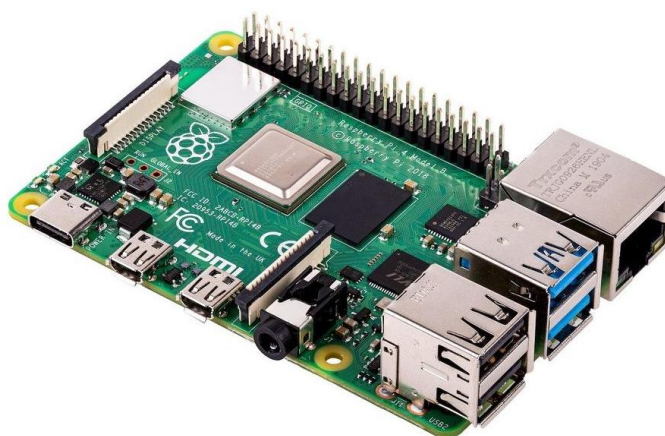


Рис. 5.5 Компьютер Raspberry Pi



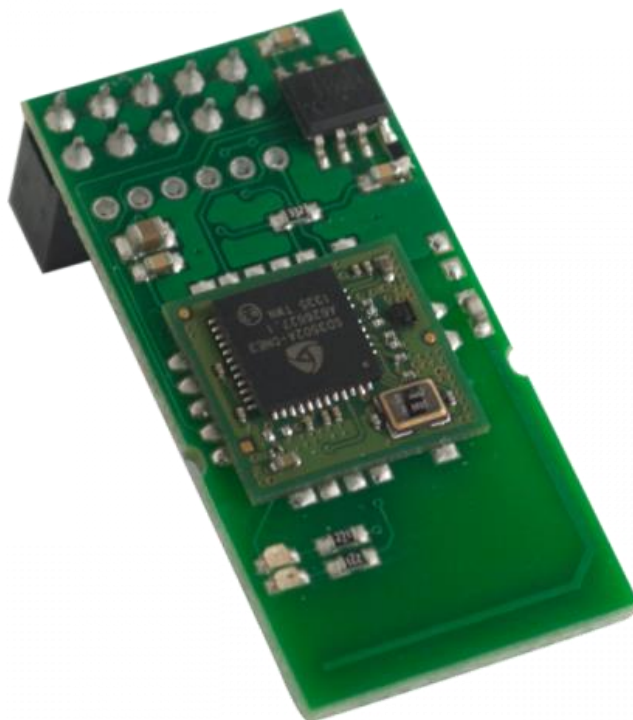


Рис. 5.6 Плата RaZberry

Для работы контроллера необходимо ПО Z-Wave, которое ставится поверх операционной системы Raspbian Wheezy с помощью команды

`wget -q -O - razberry.z-wave.me/install | sudo bash`

Далее следует подключить контроллер к локальной сети и перейти на сайт IP:8084, где будет необходимо указать свои сетевые настройки (рисунок 5.7).

The screenshot displays the 'RaZberry Configuration Interface' web application. It has a dark header with the title in white. Below the header are two tabs: 'General' and 'Advanced', with 'Advanced' being the active tab. Under 'Advanced', there are five sub-tabs: 'Remote Access', 'IP Network Setup', 'System', 'Firmware', and 'Maintenance'. The 'IP Network Setup' sub-tab is selected. The main content area is titled 'Network setting' and contains a 'LAN configuration:' section with a dropdown menu set to 'Manual'. Below this is a 'LAN configuration (eth0)' section with four input fields: 'IP address:' (192.168.0.111), 'Network mask:' (255.255.255.0), 'Gateway IP address:' (192.168.0.28), and 'MAC address:' (b8:27:eb:cb:c4:3e). There is also a 'Default DNS' section with a 'DNS IP address:' field containing '192.168.0.254'. A blue 'Save' button is located at the bottom left of the configuration area.

Рис. 5.7 Ввод сетевых настроек

После этого будет осуществлён автоматический переход на панель управления Z-Wave, где можно добавить устройства, построенные на платформе Z-Uno. Панель управления с добавлением новых устройств показана на рисунках 5.8 – 5.9.

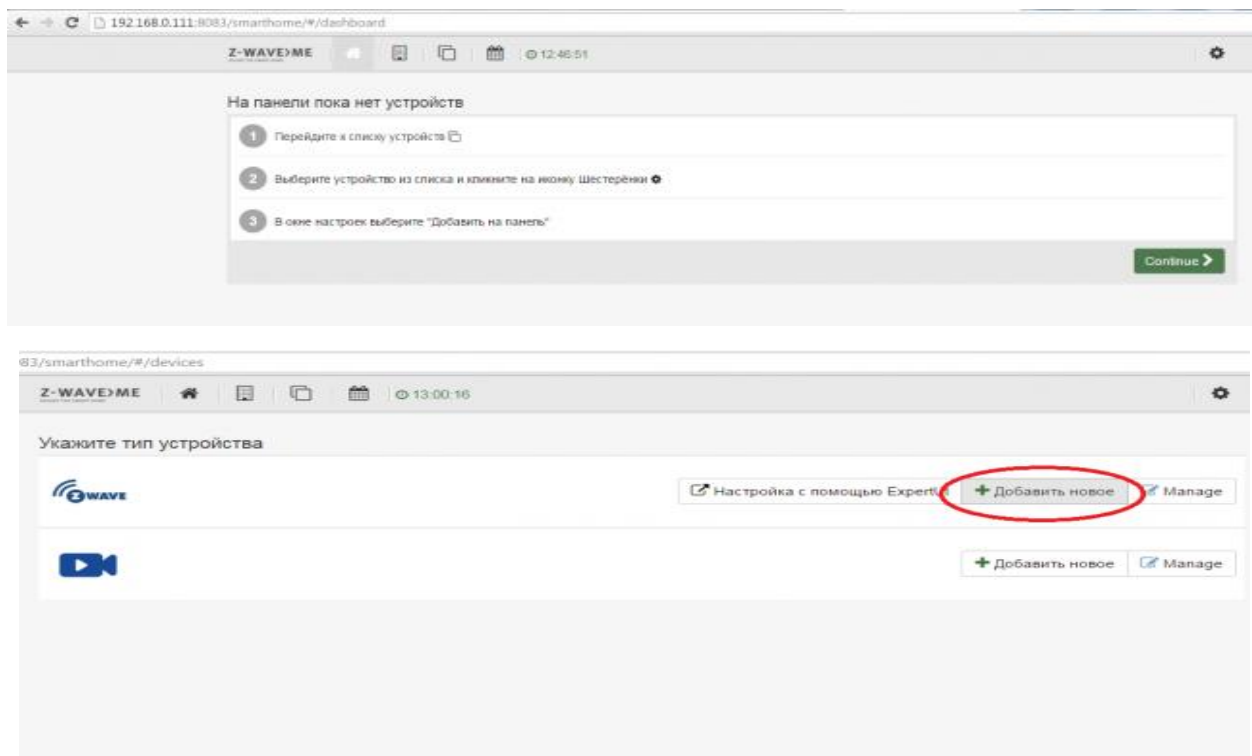


Рис. 5.8 Добавление устройства Z-Wave

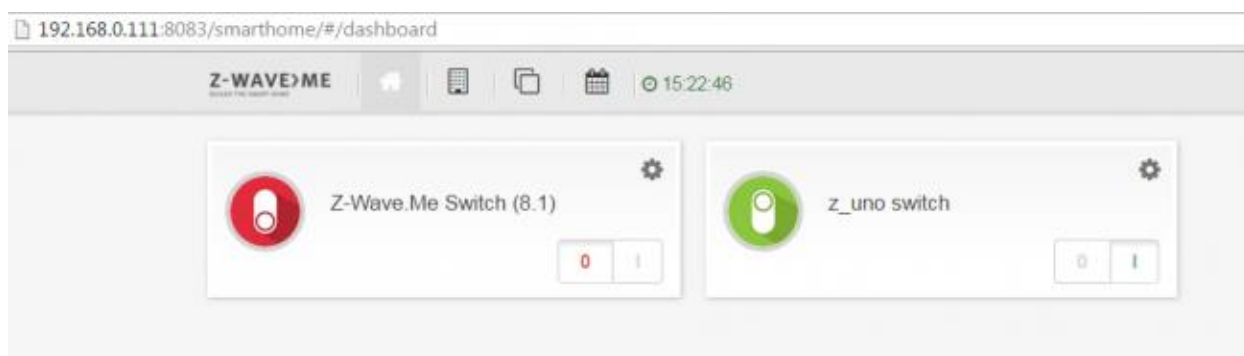


Рис. 5.9 Контроллер и датчик успешно добавлены

Таким образом можно удалённо управлять существующими устройствами Z-Wave и добавлять новые.

## 6. Оценка зоны покрытия радиосети

### 6.1. Выбор методики расчёта

Существует большое количество методов и модели планирования радиосети. В зависимости от условий эксплуатации необходимо выбрать оптимальную методику.

Данная сеть будет функционировать в помещении, следовательно, на пути распространения радиоволн расположены объекты в виде мебели и стен. Методика расчёта должна учитывать не только затухание волны в свободном пространстве, но и вследствие дифракции и рефракции из-за преграждающих объектов.

Подходящим методом является модель Окамуры-Хата, которая применяется для оценки потерь в застроенных районах города. Модель учитывает различные эффекты преломления, отражения и поглощения мешающими объектами.

Формула расчёта выглядит следующим образом:

$$L_U = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_B) - C_n + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_B)] \log_{10}(d)$$

Где:

- $L_U$  – потери в дБ;
- $h_B$  – высота антенны базовой станции в метрах;
- $f$  – частота, на которой ведётся передача в МГц;
- $d$  – расстояние между передатчиком и приёмником;
- $C_n$  – поправочный коэффициент, зависящий от частоты и высоты антенны мобильной станции;

При высоте антенны мобильной станции ( $h_m$ ) 10 метров и меньше:

$$C_n = 0.8 + (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - 1.56 \log_{10}(f)$$

### 6.2. Оценка зоны покрытия с применением программного обеспечения RadioWORKS

Данное ПО используется для анализа радиоволн, оценки зоны радиопокрытия и некоторых других параметров. Программа предлагает на выбор несколько моделей расчёта, в том числе и необходимую мне модель Окамуры-Хата. Такой инструмент удобнее и практичнее обычного калькулятора, поскольку в нём уже заложены все необходимые формулы и коэффициенты.

Интерфейс состоит из 4-х вкладок. На первой вкладке можно узнать информацию об используемой частоте, такую как:

- Длина волны в свободном пространстве;
- Вид диапазона;
- Первичный метод распространения;
- Вторичные методы распространения;
- Конфигурации передатчика.

Информация для частоты 869 МГц представлена на рисунке 6.1.

The screenshot shows the RadioWORKS application window. At the top is the title bar 'RadioWORKS' and a logo with a red arrow pointing right and the text 'Radio WORKS'. Below the logo is a help tip: '-Hover over any input field for information on valid input ranges, or click the question mark for context-sensitive help-'. There are four tabs: 'Frequency Information' (selected), 'Path Loss Calculators', 'Distance / Power Prediction', and 'Instructions / Usage Details'. The 'Frequency Information' tab contains two main sections: 'Active Frequency' and 'General Information'. In 'Active Frequency', the 'Frequency' field is set to '869' with units 'MHz' selected. A 'Get Details' button is below it. The 'General Information' section lists: 'Free Space Wavelength: 1,1323 ft. / 0,3451 m', 'Band Classification: UHF (Ultra High Frequency)', 'Primary Propagation Method: Direct / Line of Sight', 'Secondary Propagation Method(s): Ducting / Reflection', and 'Transmitter Configurations: Fixed Base / Satellite / Marine / Mobile / Portable'. Below these is an 'Approximate Antenna Lengths' section with a list: '5/8 Wave: 8,0783 in. / 20,5188 cm', '1/2 Wave: 6,4626 in. / 16,4150 cm', '1/4 Wave: 3,2313 in. / 8,2075 cm', and '1/8 Wave: 1,6157 in. / 4,1038 cm'.

Рис. 6.1 Информация о частоте

На следующей вкладке можно выбрать нужный метод расчёта и получить либо потери, либо максимальное расстояние между передатчиком и приёмником.

Из спецификации (пункт 3.1.2 Технические характеристики (приёмопередатчика)) известны минимальная мощность передатчика 10 дБ и чувствительность приёмника -95 дБм. Следовательно, максимально допустимое затухание составляет 85 дБ.

Представлю, что передатчиком является контроллер Z-Wave, а приёмником датчик движения. Высоты антенн будут примерно 1 метр у контроллера и 2 метра у датчика, т.к. он будет расположен под потолком. Результат расчёта показан на рисунке 6.2.

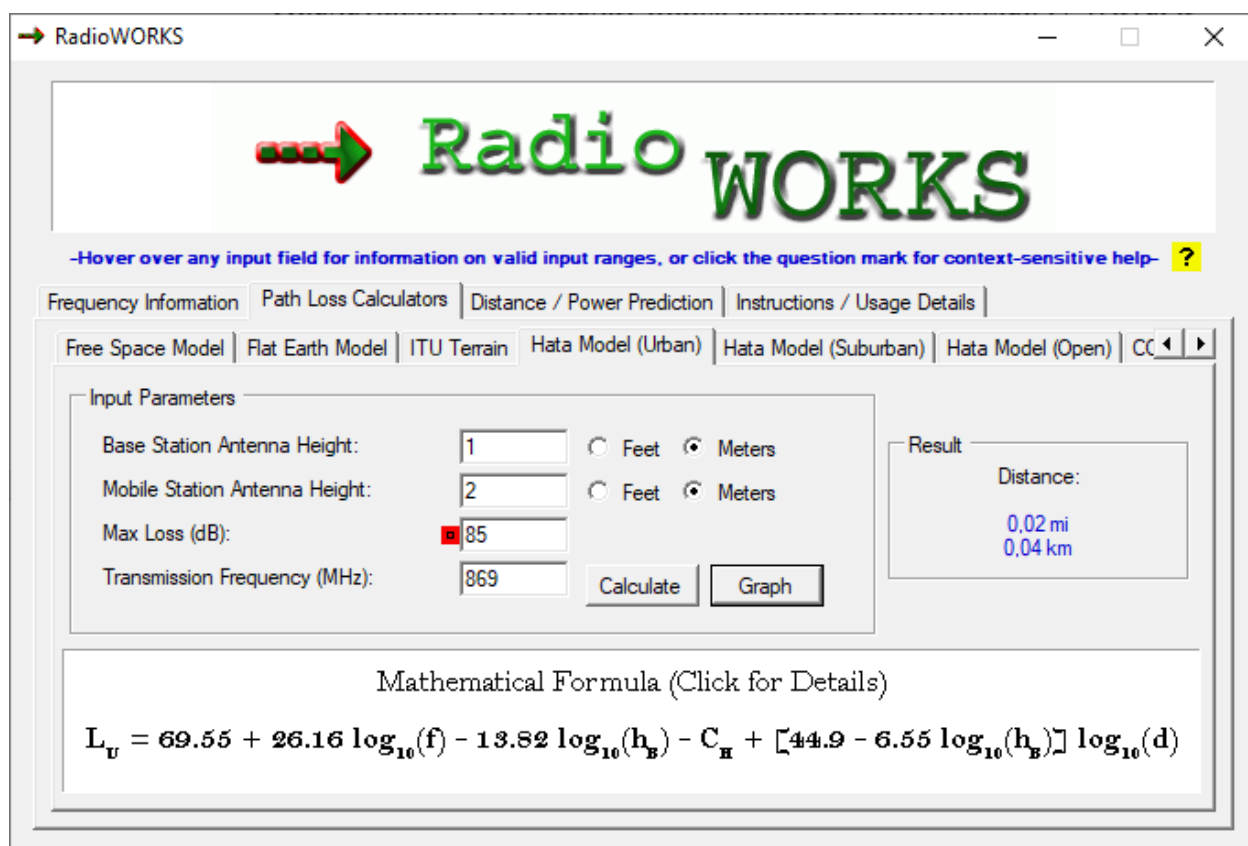


Рис. 6.2 Результат расчёта

В результате при заданных высоте антенн и частоте передачи я получил зону покрытия 40 метров.

Программа также позволяет спрогнозировать изменение дальности связи с увеличением мощности передачи. Для этого в соответствующей вкладке требуется указать посчитанную ранее дальность, старое и новое значение мощности передатчика.

Из спецификации известно, что максимальная мощность передатчика составляет 20 дБ. На рисунке 6.3 представлена новая дальность связи при увеличении мощности передатчика. Кроме того, я также показал график изменения дальности в зависимости от мощности.

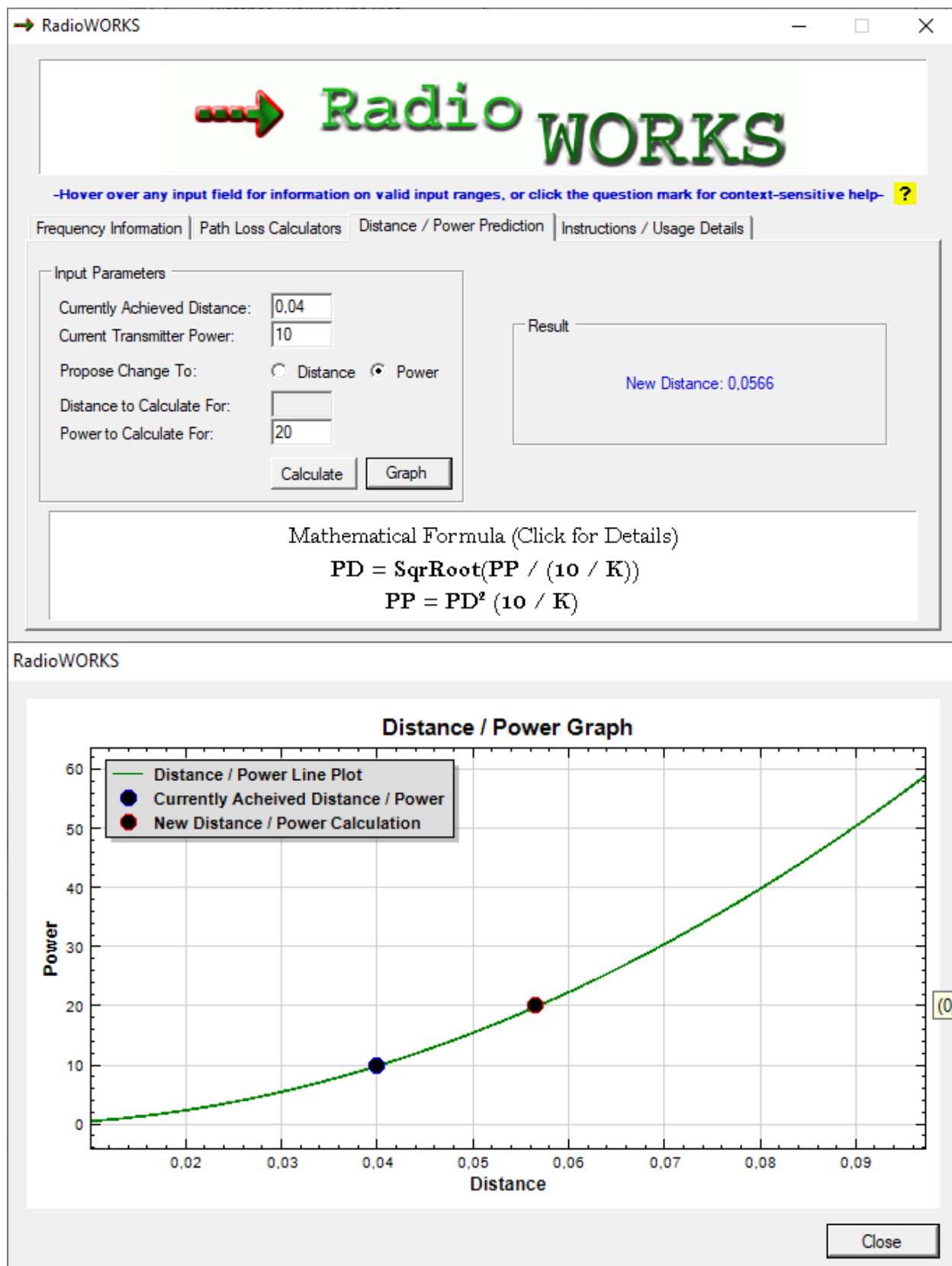


Рис. 6.3 Результаты изменения мощности

### 6.3. Анализ полученных результатов

Производителем Z-Wave заявлен радиус связи до 30 метров (пункт 2.6 Сводная таблица характеристик). В результате расчёта я смог получить 40 метров, причём на минимальной мощности. При работе на повышенной мощности дальность связи увеличивается до 56 метров, что является отличным показателем для построения сети сбора данных внутри жилого помещения или даже производственного цеха.

#### Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы я познакомился с различными интеллектуальными сетями для сбора данных. Для применения такой сети я выбрал направление «Умный дом» как одно из наиболее востребованных в современном мире.

Среди возможных технологий для построения сети домашней автоматизации мною была выбрана Z-Wave, т.к. она оказалась перспективнее остальных (Wi-Fi, BLE, ZigBee) в результате сравнительного анализа.

Далее я подробнее рассмотрел, что из себя представляет Z-Wave. Начать следовало с фундамента, а именно с физического уровня. После описания профилей работы, вида модуляции и кодирования я описал структуру сформированного пакета физического уровня. Кроме того, были выдвинуты требования к приёмно-передающему устройству, согласно спецификации ITU-T G.9959.

После этого я поднялся выше на сетевой уровень и уровень приложения. То есть, были рассмотрены виды устройств, какие команды используются для управления и контроля сетью. Также я показал топологию сети с её плюсами.

Следующим этапом стал ответ на вопрос: «Как построить такую сеть?» Для ответа я воспользовался двумя решениями: Z-Uno для разработки исполняющего устройства и RaZberry для контроллера. В соответствующем разделе я показал написанный код на языке C в среде Arduino IDE для датчика движения. Разработанный на мини-компьютере Raspberry Pi с использованием расширяющей платы RaZberry от Z-Wave.me был объединён в единую локальную сеть с датчиком движения, созданным на Z-Uno.

Последним шагом был анализ радиуса покрытия такой сети. Для этого я воспользовался одним из методов оценки потерь, что позволило быстро посчитать максимальную дальность связи.

### Библиографический список

1. Сергей Полторак. Делаем собственное Z-Wave устройство на базе Z-Uno // habr.com 20.12.2012 [Электронный ресурс] - <https://habr.com/ru/company/zwave/blog/367571/>
2. Сергей Полторак. RaZberry — умный дом на базе Z-Wave и Raspberry Pi // habr.com 31.03.2013 [Электронный ресурс] - <https://habr.com/ru/company/zwave/blog/174825/>
3. Русский перевод книги Кристиана Пентца «Основы Z-Wave» Z-Wave Russia // z-wave.ru [Электронный ресурс] - <https://www.z-wave.ru/vvedenie.html>
4. Основы построения сети Z-Wave // superhome.pro [Электронный ресурс] - <https://superhome.pro/osnovy-postroeniia-seti-z-wave/>
5. Сергей Полторак. Немного о технологии Z-Wave // habr.com 20.12.2012 [Электронный ресурс] - <https://habr.com/ru/company/zwave/blog/163387/>
6. Международный союз телекоммуникаций. Recommendation ITU-T G.9959. Раздел 7: PHY specification
7. Дов Нимрац. IoT архитектура. // habr.com 10.06.2019 [Электронный ресурс] - <https://habr.com/ru/post/455377/>
8. В. Г. Орлов, С. Г. Тюмин. Стандарты беспроводной связи для системы Умный дом  
<http://www.srd-mtuci.ru/attachments/article/296/ТИТ-2-2020.pdf>
9. А. П. Даденкова, Тюрин С. А. Протоколы домашней автоматизации.  
<https://innotech.pstu.ru/archive/2019.pdf>