

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.77:004.6

Горчаков
Владислав Николаевич

Построение беспроводных систем мониторинга с использованием сетей
передачи данных LoRaWAN

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-39 80 02 «Радиотехника, в том числе системы и
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения»

Научный руководитель
Давыдов Игорь Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент

Минск 2023

Введение

В настоящее время технология «Интернет вещей» все больше используется в таких сферах, как промышленное производство, сельское хозяйство, коммунальное хозяйство, городское хозяйство, транспорт, энергетика, экология, медицина. Использование этой технологии позволяет осуществлять непрерывный мониторинг различных показателей, накопление необходимых данных и их анализ для принятия рациональных решений.

«Интернет вещей» (англ. *Internet of Things, IoT*) – концепция, представляющая собой сеть физических объектов (вещей), которые оснащены встроенными средствами для взаимодействия друг с другом или с окружающей средой. Технология «Интернета вещей» отличается от старых сенсорных сетей тем, что представляет собой не просто телекоммуникационную сеть передачи данных между сенсорами, а комплексную инфраструктуру, состоящую из таких узлов, как конечные устройства-сенсоры, сетевые серверы, серверы приложений, конечные приложения, облачные приложения, методы анализа полученных данных и алгоритмы принятия решений. Взаимодействие различных устройств в такой сети может осуществляться с помощью радио или проводных каналов передачи данных.

Одной из технологий, позволяющих строить такие сети, является технология передачи данных физического уровня *LoRa* и сеть *LoRaWAN* на её основе, позволяющая реализовать быстрое развёртывание сетей с возможностью адаптивного масштабирования. Технология *LoRa* модуляции отличается более эффективным использованием ресурсов элементов питания, низким энергопотреблением, большой автономностью работы, редким обслуживанием и большой дальностью передачи.

Сети «Интернета вещей» с *LoRa* могут быть использованы в различных случаях, когда, например, устройства должны работать от батареи и работать в полевых условиях длительное время. Сети, интегрированные с *LoRa*, такие как *LoRaWAN*, имеют дальность связи до пятнадцати километров при прямой видимости между устройствами в условиях сельской местности. Будучи открытой платформой, работающей в нелицензионном диапазоне, модель развёртывания сети для устройств *LoRa* является гибкой и может быть адаптирована под различные бизнес-модели и решение различных задач.

Технология *LoRaWAN* в настоящий момент получила распространения по всему миру. В 2015 году была организована открытая, некоммерческая организация «*LoRa Alliance*», которая в настоящий момент насчитывает более чем пятьсот участников. Сообщество занимается разработкой и совершенствованием стандартов, внедрением новых возможностей *LoRaWAN*.

Общая характеристика работы

В магистерской диссертации рассматривается построение беспроводных систем мониторинга с использованием сетей передачи данных *LoRaWAN*, методика конфигурирования аппаратной и программной части шлюза, сетевого сервера и сервера приложений для работы в составе сети, особенности разработки и настройки конечных устройств-сенсоров. Также рассматриваются особенности разработки и конфигурирования конечных приложений с использованием современных IoT протоколов передачи данных таких, как *MQTT*. В заключительной части работы проводится лабораторный эксперимент, целью которого является исследование зоны покрытия построенной *LoRaWAN* сети.

Целью магистерской диссертации является разработка беспроводной системы мониторинга на основе сети передачи данных *LoRaWAN* и исследование зоны её покрытия.

Задачи магистерской диссертации:

- изучить методы и технологии построения сетей передачи данных *LoRaWAN*;
- разработать структурную схему лабораторной установки;
- реализовать узлы лабораторной установки в виде программно-аппаратных макетов;
- конфигурировать программную часть шлюза, сетевого сервера и сервера приложений.
- разработать программное обеспечение конечного устройства;
- конфигурировать конечное устройство для работы в сетях *LoRaWAN* с учётом необходимого регионального стандарта.
- разработать конечное приложения с возможностью отображения полезной нагрузки и системной информации;
- провести эксперимент, в ходе которого выявить зону покрытия построенной *LoRaWAN* сети и её характеристики.

Объект исследования – беспроводные системы мониторинга с использованием сетей передачи данных *LoRaWAN*.

Предмет исследования – архитектура построения сетей передачи данных *LoRaWAN*, методы и технологии её реализации.

Значимость диссертационной работы заключается в возможности практического применения полученных результатов при построении беспроводных систем мониторинга с использованием сетей передачи данных *LoRaWAN*, а также в учебном процессе.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в рассмотрении и использовании инновационных методов и технологий построения беспроводных сетей мониторинга в контексте технологии «Интернет вещей». При практической реализации использована актуальная архитектура LoRaWAN сетей и внедрены современные протоколы передачи данных.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, а также их обработка, анализ и интерпретация, получены автором самостоятельно.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР в секции «Информационные радиотехнологии» (Минск, Республика Беларусь, 2023).

Также результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Информационных радиотехнологий» при проведении лабораторных работ по учебной дисциплине: «Программно-техническая реализация Интернета вещей».

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликована 1 печатная работа в сборнике трудов и материалов конференций БГУИР.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести разделов, заключения, списка использованных источников и четырех приложений.

В первом разделе приведено описание сетей передачи данных на основе LoRaWAN.

Во втором разделе рассматривается разработка структурной схема лабораторного макета.

В третьем разделе рассматривается разработка управляющего узла LoRaWAN сети.

В четвертом разделе рассматривается разработка конечного устройства и особенного его взаимодействия с базовой станцией.

В пятом разделе рассматривается разработка конечного приложения и особенности его взаимодействия с сервером приложений.

Шестой раздел посвящен проведению исследований построенной LoRaWAN сети.

Общий объём магистерской диссертации составляет 104 страницы. Из них 51 страница основного текста, 110 иллюстраций, 13 таблиц, библиографический список из 35 наименований на 3 страницах, 6 приложений на 12 страницах.

Краткое содержание работы

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная значимость исследований, а также апробация работ

Во **введении** определена область и указаны основные направления исследования, показана актуальность темы диссертационной работы, дана краткая характеристика вопроса

Первый раздел «Описание сетей передачи данных LoRaWAN» носит теоретический характер. В данном разделе рассматривается архитектура построения LoRaWAN сетей (рисунок 1), особенности LoRa-модуляции, классы устройств, особенности MAC-команд, присоединения конечных устройств с помощью алгоритма ABR (Activation By Personalization) и OTTA (Over-The-Air Activation), адаптация скорости передачи, технология ADR (Adaptive data rate).

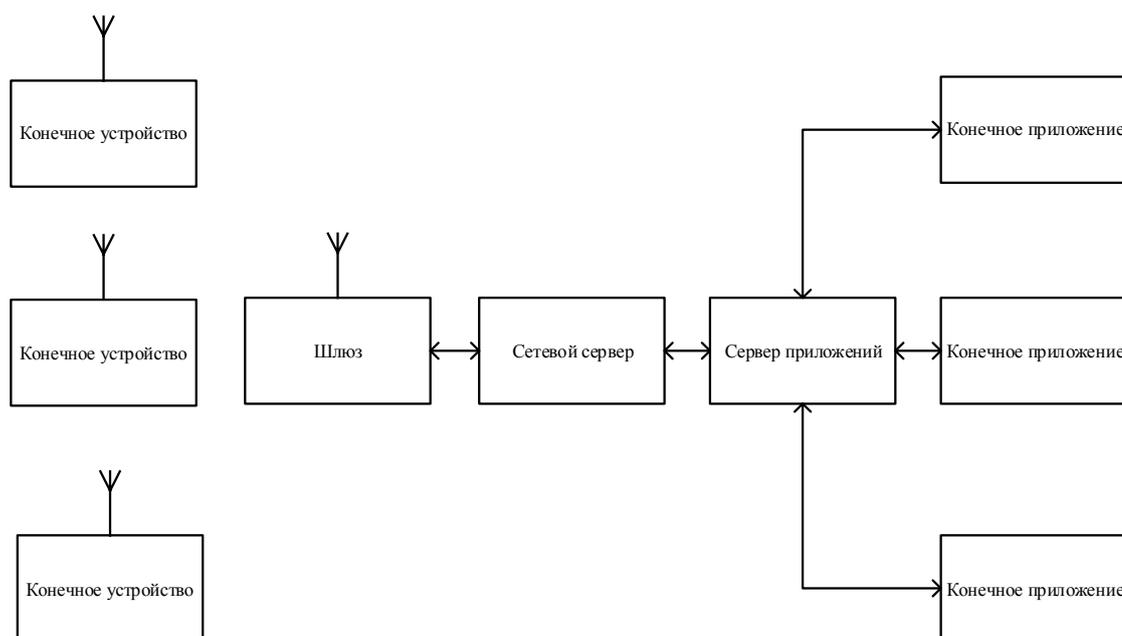


Рисунок 1 – Структура LoRaWAN сети

Во **втором разделе** рассматривается общее описание лабораторной установки. Структурная схема представлена на рисунке 1.

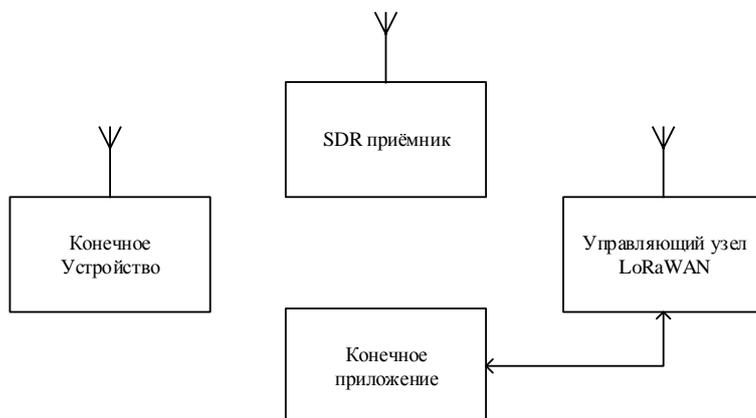


Рисунок 2 – Структурная схема лабораторной установки

Третий разделе «Разработка управляющего узла LoRaWAN сети» состоит из двух подразделов.

В **первом подразделе** «Разработка аппаратной части» рассматриваются аппаратные модули необходимые для построения шлюза LoRaWAN и интеграции его с сетевым сервером. В качестве шлюза используется модуль RAK2287 от компании Rakwireles, поддерживающее региональный стандарт EU868 МГц. Для подключения шлюза к отладочной плате Raspberry Pi Compute Module 4 IO Board используется переходная плата RAK2287 Pi Hat. Переходная плата устанавливается в отладочную плату Compute Module 4 PoE Board (B). Далее данную плату интегрируется одноплатный компьютер Raspberry Pi Computer Module 4 (CM4104032). Структурная схема аппаратной реализации представлена на рисунке 3. Управляющий узел в собранном виде представлен на рисунке 4.

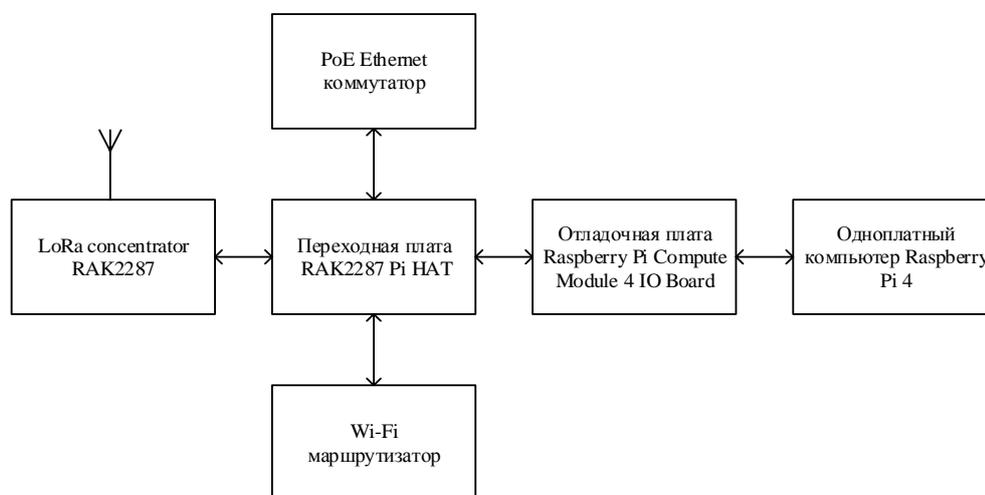


Рисунок 3 – Структурная схема аппаратной части управляющего узла



Рисунок 4 – Управляющий узел LoRaWAN сети

Во **втором подразделе** «Разработка аппаратной части» рассматривается программная реализация управляющего узла на основе созданной аппаратной архитектуре. Структурная схема представлена на рисунке 5.

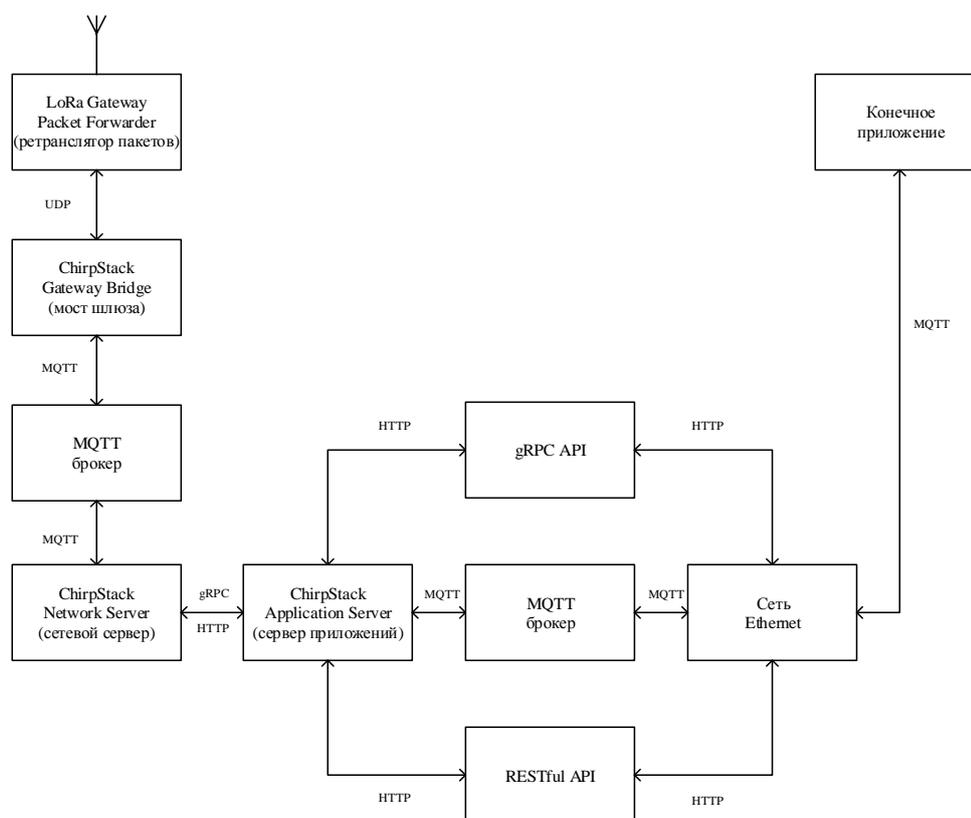


Рисунок 5 – Структурная схема программной реализации управляющего узла

В подразделе рассматривается реализация ретранслятора пакетов, моста шлюза, сетевого сервера, сервера приложений и взаимодействия между ними. Управляющий узел LoRaWAN сети построен на базе операционной системы Linux и стека технологий ChirpStack, который включает в себя реализацию Gateway Bridge, Network Server, Application Server, а также некоторые сервисы интеграции. Имеется веб-интерфейс для управления устройствами и различные API для интеграции со сторонними сервисами. Модульная архитектура делает возможной интеграцию в существующую инфраструктуру. ChirpStack представляет собой свободно распространяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом и возможностью гибкой настройки.

В подразделе подробно рассматривается процесс разворачивания ChirpStack экосистемы, а также настройки и конфигурирование запущенного сетевого сервера. На рисунке 6 показан поток принятых шлюзом и обработанных сетевым сервером LoRa-фреймов.

TIME	STATUS	FREQ	SF	BW	FCNT	DEVADDR	GW
Apr 28 1:23:46 PM	UnconfirmedDataDown	867.9 MHz	SF12	BW125	FCnt: 1061	DevAddr: 00858c37	
Apr 28 1:14:48 PM	UnconfirmedDataDown	867.9 MHz	SF12	BW125	FCnt: 969	DevAddr: 0167c56e	
Apr 28 1:12:45 PM	UnconfirmedDataDown	867.7 MHz	SF12	BW125	FCnt: 580	DevAddr: 0185048e	
Apr 28 12:49:37 PM	UnconfirmedDataDown	867.7 MHz	SF12	BW125	FCnt: 1053	DevAddr: 0147ada2	
Apr 28 12:31:46 PM	UnconfirmedDataDown	867.3 MHz	SF12	BW125	FCnt: 1512	DevAddr: 0171cb2d	
Apr 28 12:16:50 PM	UnconfirmedDataDown	867.3 MHz	SF12	BW125	FCnt: 1048	DevAddr: 00cb41b3	
Apr 28 11:44:46 AM	UnconfirmedDataDown	867.7 MHz	SF12	BW125	FCnt: 641	DevAddr: 001cb67f	
Apr 28 11:20:09 AM	UnconfirmedDataDown	867.3 MHz	SF12	BW125	FCnt: 1	DevAddr: 00f7bbb8	
Apr 28 11:10:27 AM	ConfirmedDataUp	868.1 MHz	SF12	BW125	FPort: 11 FCnt: 5	DevAddr: 04e209bc	
Apr 28 10:59:04 AM	UnconfirmedDataDown	868.5 MHz	SF9	BW125	FCnt: 50	DevAddr: 01f58593	GW: e45f01ffe6296a0

Рисунок 6 – Веб-страница с отображением потока принятых LoRa-фреймов

В четвёртом разделе «Разработка конечного устройства» в первом подразделе «Аппаратная часть» рассматривается разработка аппаратных модулей необходимых для создания конечного устройства, поддерживающего работу в LoRaWAN сетях. Разработанное конечное устройство (рисунок 7)

состоит из микропроцессорной системы WROOM ESP32, приёмо-передающего модуля Ai-Thinker RA08H, навигационного модуля Ublox NEO-6M, дисплея OLED SSD1306, датчика влажности и температуры DHT11. Конечное устройство в собранном на макетной плате виде представлено на рисунке рисунок 8.

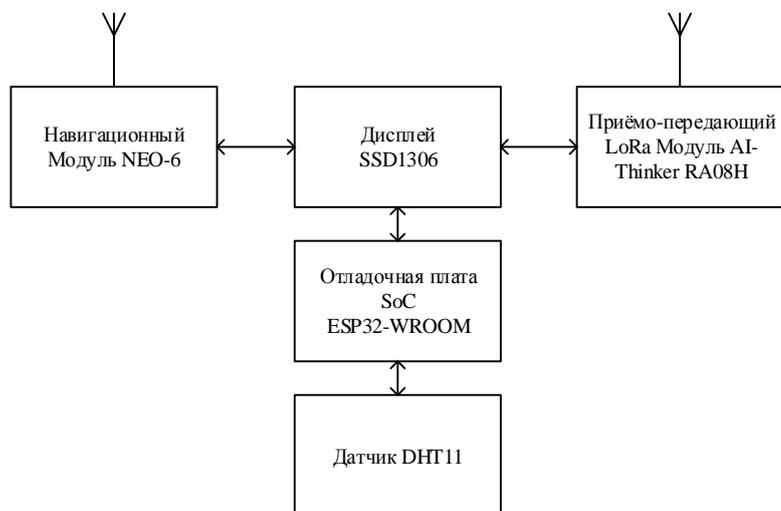


Рисунок 7 – Структурная схема конечного устройства

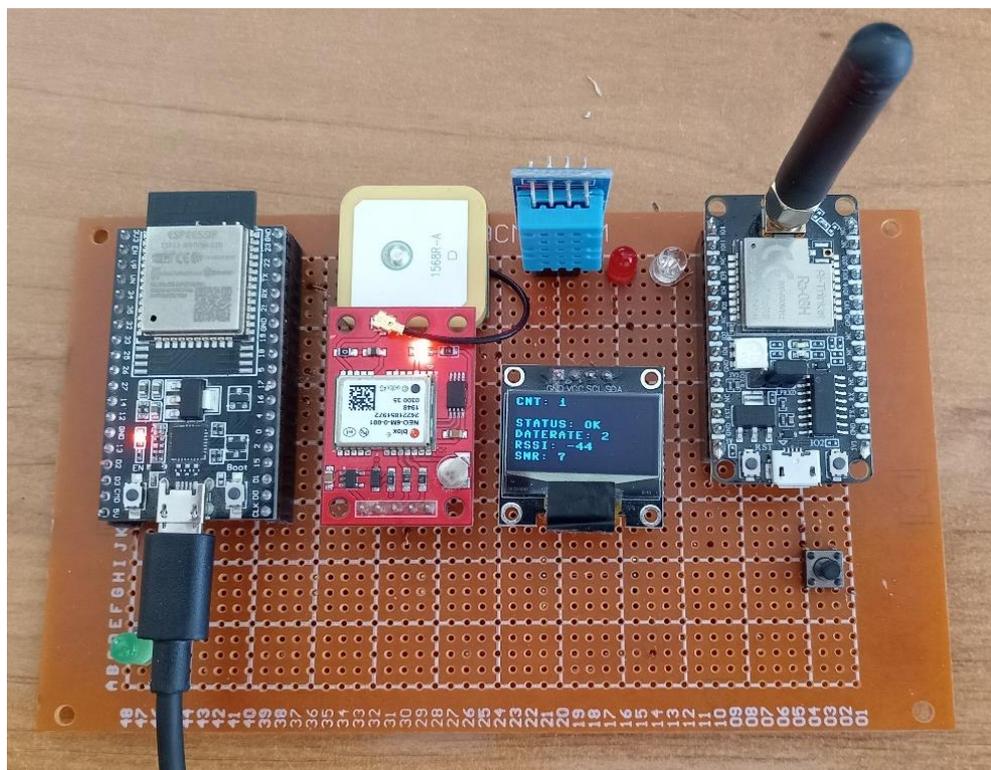


Рисунок 8 – Конечное устройство в собранном виде

Во втором подразделе «Подключение конечного устройство» рассматриваются особенности присоединение конечного устройства к серверу

приложений, создание и запись на конечное устройство идентификатора (DevEUI), идентификатора приложения (AppEUI) и ключа приложения (AppKey). Также рассматриваются особенности передачи восходящих сообщений с полезной нагрузкой с различными значениями коэффициента расширения спектра. Для управления приема-передатчиком RA08H, навигационный модулем, дисплеем, датчиком, а также кодировки полезной нагрузки в формат Cayenne LPP 2.0 было реализовано программное обеспечение для SoC ESP32-WROOM на языке программирования MicroPython.

Также в подразделе рассматривается конфигурирование сервера приложений ChirpStack для взаимодействия с конечным устройством. Пример потока восходящих LoRa-фреймов, полученных сервером приложений представлен на рисунке 9. В качестве полезной нагрузки были переданы значения температуры и влажности, полученные с датчика DHT11. Содержание полученного восходящего фрейма в развернутом виде представлено на рисунке 10.

Applications / ra08h-devices / Devices / RA08H-1 DELETE

DETAILS CONFIGURATION KEYS (OTAA) ACTIVATION DEVICE DATA >

HELP PAUSE DOWNLOAD CLEAR

Jun 16 1:39:18 PM	up	868.1 MHz	SF7	BW125	FCnt: 118	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:39:13 PM	up	868.1 MHz	SF7	BW125	FCnt: 117	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:39:07 PM	up	868.1 MHz	SF7	BW125	FCnt: 116	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:39:01 PM	up	868.1 MHz	SF7	BW125	FCnt: 115	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:38:55 PM	up	868.3 MHz	SF7	BW125	FCnt: 114	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:38:50 PM	up	868.1 MHz	SF7	BW125	FCnt: 113	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:38:44 PM	up	868.3 MHz	SF7	BW125	FCnt: 112	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:38:38 PM	up	868.5 MHz	SF7	BW125	FCnt: 111	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:38:33 PM	up	868.3 MHz	SF7	BW125	FCnt: 110	FPort: 10	Confirmed	▼
Jun 16 1:38:27 PM	up	868.3 MHz	SF7	BW125	FCnt: 109	FPort: 10	Confirmed	▼

Рисунок 9 – Веб страница с отображением потока фреймов

```
applicationID: "6"
applicationName: "ra08h-devices"
deviceName: "RA08H-1"
devEUI: "eb847aa7eca57a81"
▼ rxInfo: {} 1 item
  ▼ 0: {} 14 keys
    gatewayID: "e45f01fffe6296a0"
    time: "2023-06-16T11:15:23.554658Z"
    timeSinceGPSEPOCH: "1370949342.554s"
    rssi: -45
    loRaSNR: 13.2
    channel: 1
    rfChain: 1
    board: 0
    antenna: 0
    ▶ location: {} 5 keys
      fineTimestampType: "NONE"
      context: "YW1TIw=="
      uplinkID: "54ca1957-8153-4b87-83d1-cb1079e2ad49"
      crcStatus: "CRC_OK"
  ▼ txInfo: {} 3 keys
    frequency: 868300000
    modulation: "LORA"
  ▼ loRaModulationInfo: {} 4 keys
    bandwidth: 125
    spreadingFactor: 9
    codeRate: "4/5"
    polarizationInversion: false
  adr: false
  dr: 3
  fCnt: 7
  fPort: 10
  data: "AWhEAWcBDg=="
  ▼ objectJSON: {} 2 keys
    ▼ temperatureSensor: {} 1 key
      1: 27
    ▼ humiditySensor: {} 1 key
      1: 34
  tags: {} 0 keys
  confirmedUplink: true
  devAddr: "00678980"
  publishedAt: "2023-06-16T10:48:11.038975375Z"
```

Рисунок 10 – Полученный фрейм в развернутом виде

В пятом разделе «Разработка конечного приложения» рассматривается разработка веб-приложения Dashboard, позволяющего отображать системную информацию и полезную нагрузку. Результат представлен на рисунке 11.



Рисунок 5.5 – Веб-страница Dashboard

В шестом разделе магистерской диссертации «Исследование построенной сети» рассматривается методика и алгоритма проведения исследования зоны покрытия работающей LoRaWAN сети. В первом подразделе «Исследование LoRaWAN сети внутри помещения» выявляется зона покрытия LoRaWAN сети внутри учебного корпуса при использовании различных значений коэффициента расширения спектра. Результаты приведены обработаны и приведены на рисунках и в таблицах. Во втором подразделе «Исследование LoRaWAN сети на прилегающей территории» проводится исследования на территории прилегающей к учебному корпусу.

Заключение

В ходе выполнения магистерской диссертации была выполнена разработка лабораторной установки для построения сети стандарта *LoRaWAN*, состоящего из конечного устройства и базовой станции. Была разработана структурная схема базовой станции с дальнейшей реализацией в виде рабочего лабораторного макета на основе выбранных отладочных плат. Также была

разработана структурная схема конечного устройство с последующей реализацией в виде макетной платы.

Также было установлено и настроено программное обеспечения, необходимое для обеспечения работы шлюза, сетевого сервера и сервера приложений по протоколу *LoRaWAN*.

Также было разработанного программного обеспечения, обеспечивающее работу конечного устройства в сетях *LoRaWAN* в различных режимах и позволяющее при проведении эксперимента выделить, отобразить и сохранить измеряемые величины.

Кроме того, было разработано конечное приложение, позволяющие динамически отображать полезную нагрузку и системную информацию, необходимую при проведении экспериментов.

В заключительной части магистерской диссертации были проведены эксперименты внутри помещения и на прилегающей территории. В ходе проведения экспериментов были измерены основные характеристики *LoRa*-модулированных сигналов в различных контрольных точках и выявлена зона покрытия *LoRaWAN* сети в пределах учебного корпуса и на прилегающей территории.

Лабораторная установка, разработанная в ходе выполнения магистерской диссертации, может быть использованы для проведения дальнейших исследований по теме, при проведении лабораторных работ по дисциплинам, связанным с сетями передачи данных в контексте технологии «Интернет вещей».

Также результаты исследования, проведенного в ходе выполнения магистерской диссертации, могут быть использованы при построении *LoRaWAN* сетей.

Список опубликованных работ

1. Горчаков, В. Н. Лабораторная установка для исследования характеристик *LoRaWAN* сетей / Горчаков В. Н. // Радиотехника и электроника: сборник тезисов докладов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2023 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск: БГУИР, 2023. – С. 24.