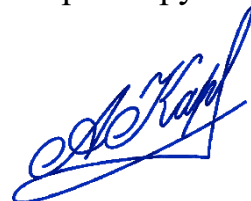


Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева

УДК 621.311

На правах рукописи



**КАРМАНОВ АРТЁМ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**Разработка цифровых средств радиотелеметрии для IoT устройств**

7М07110 «Робототехнические, интеллектуальные системы и  
приборостроение»

Магистерский проект на соискание академической степени  
магистра техники и технологий

Научный руководитель  
Кандидат технических наук, ассоциированный профессор  
Савостин Алексей Александрович

Республика Казахстан  
Петропавловск, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
1 Обзор концепции IoT (интернет вещей) .....	4
1.1 Общие сведения об IoT .....	4
1.2 Краткий обзор технологий IoT .....	5
1.2.1 Средства идентификации .....	5
1.2.2 Средства телеметрии .....	5
1.2.3 Средства обмена трафиком .....	5
1.3 Области использования IoT .....	6
1.3.1 Бытовые IoT решения .....	6
1.3.2 IoT решения для здравоохранения .....	6
1.3.3 IoT в промышленности .....	6
1.3.4 IoT в сельском хозяйстве .....	7
1.3.5 IoT в продовольственной сфере .....	8
1.3.6 Инфраструктурные IoT решения .....	8
1.3.7 IoT в энергетической отрасли .....	9
1.3.8 IoT в оборонной отрасли .....	10
2 Обзор современных беспроводных технологий .....	11
2.1 Типы беспроводных сетей .....	11
2.2 LPWAN технологии беспроводной связи .....	13
2.2.1 Общие сведения о LPWAN сетях .....	13
2.2.2 SIGFOX технология .....	15
2.2.3 LoRa технология .....	17
2.2.4 Сравнительный анализ SIGFOX и LoRa .....	20
3 Разработка схемы электрической принципиальной радиомодема .....	22
4 Трассировка печатной платы радиомодема .....	23
5 Разработка управляющего ПО радиомодема .....	24
6 Разработка прикладного ПО обмена трафиком через Ethernet интерфейс радиомодема .....	25
7 Результаты трассовых испытаний радиомодема .....	26
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	27
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	28
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> LoRa Радиомодем. Схема электрическая принципиальная .....	37
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> LoRa Радиомодем. Чертёж топологии печатной платы .....	38
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> LoRa Радиомодем. Листинг исходного кода управляющей программы .....	39

## ВВЕДЕНИЕ

Термин IoT (Интернет вещей), подразумевает коллективную сеть, которая обеспечивает связь устройств с Интернетом, а также устройств друг с другом. Благодаря разнообразию современных цифровых микросхем, датчиков и исполнительных устройств, существуют миллиарды IoT устройств, подключенных к сети Интернет.

Количество таких устройств и требования к их качественным показателям продолжают расти по мере цифровизации и развития технологий. Взаимодействие этих устройств друг с другом и с сетью Интернет было бы невозможным без цифровых средств радиотелеметрии, которым посвящён настоящий проект.

Цель проекта – разработка аппаратно-программного решения для цифровых средств радиотелеметрии, которое обеспечит энергоэффективный, помехоустойчивый обмен данными между портативными IoT устройствами с батарейным питанием.

Задача проекта – выполнить анализ концепции IoT и технических возможностей современных технологий беспроводной связи, на основе результатов которого выбрать технологию для разработки аппаратно-программного решения по критериям оптимального баланса между энергопотреблением, скоростью обмена, используемым спектром частот, бюджетом канала связи и доступностью элементной базы, реализующей аппаратную часть.

В процессе разработки используются методы анализа научной литературы, моделирования и экспериментальные исследования на базе созданных прототипов цифровых средств радиотелеметрии.

Научная новизна проекта заключается в разработке нового аппаратно-программного решения для беспроводного обмена цифровым трафиком, на базе современных технологий формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций радиоизлучения.

Теоретическая значимость проекта заключается в расширении и систематизации теоретической базы, посвящённой возможностям современных технологий беспроводной связи.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанных цифровых средств радиотелеметрии для реализации IoT устройств широкого спектра применения (промышленность, коммунальная инфраструктура, сельское хозяйство и другие).

Достоверность результатов, полученных в ходе разработки проекта, подтверждается эмпирическими показателями, демонстрируемыми с помощью натуральных образцов разработанных устройств.

Краткий обзор результатов теоретического и практического исследования, предшествующих разработке, изложен в научной статье «ТЕХНОЛОГИЯ LoRa КАК СРЕДСТВО ЦИФРОВОЙ РАДИОТЕЛЕМЕТРИИ ДЛЯ IoT УСТРОЙСТВ», опубликованной автором настоящего проекта в журнале «Вестник СКУ имени М. Козыбаева» №1(57) 2023 стр.100-106.

# 1 Обзор концепции IoT (интернет вещей)

## 1.1 Общие сведения об IoT

**Интернет вещей** (далее – IoT, сокращение от английского *internet of things*) – парадигма построения сети передачи/приёма информации между вещами, имеющими соответствующее аппаратное обеспечение, позволяющее, преимущественно беспроводным способом, обмениваться трафиком между однотипными устройствами или с внешней средой [1]. Концептуальную основу IoT составляет обеспечение возможности автоматизировать повседневные процессы, минимизировав вовлечение в них человеческих ресурсов [2].

Впервые IoT концепция была сформулирована в 1999 г. в форме анализа потенциальных возможностей использования ресурсов беспроводной идентификации для обмена данными между устройствами.

В период с 2000 по 2010 годы, по мере распространения беспроводных технологий, развития межмашинного обмена данными и применения протоколов IPv6 [4], концепция IoT обрела разнообразным технологическим наполнением и всё чаще применялась для решения практических задач.

Одной из первых обширных работ, посвящённых IoT [8], считается статья, опубликованная в журнале *Scientific American* в 2004 году. Основной акцент той публикации был направлен на объединение «вещей» (физических устройств) в сеть, которая обслуживается IP протоколами [2]. Также в статье была приведена наглядная иллюстрация того, как различные бытовые приборы (кондиционер, система освещения, система полива, охранная сигнализация и прочее) взаимодействуют друг с другом посредством беспроводной связи.

Национальный разведывательный совет США в своём докладе 2008 года характеризует «интернет вещей» как одна из опасных технологий, которая способна увеличить риски в области государственной кибербезопасности [9].

По оценкам аналитиков компании Cisco в 2009 году число вещей, подключенных к интернету, превысило число жителей Земли. По этой причине принято считать, что именно в этот период интернет людей превратился в интернет вещей.

## **1.2 Краткий обзор технологий IoT**

### **1.2.1 Средства идентификации**

Востребованность использования идентификации интернет вещей связана с тем, что в IoT присутствуют физические объекты, не имеющие возможности включения в сети обмена данными. Для таких объектов уникальность идентификационных номеров обеспечивается преимущественно с помощью технологии RFID (бесконтактная радиочастотная идентификация).

Для уникальной идентификации вещей, имеющих подключение к сети интернет, традиционно используются сетевые MAC адреса.

Пространство MAC адресов, поддерживаемое протоколом IPv6, позволяет обеспечить каждого жителя Земли почти 300 000 000 уникальных идентификаторов.

### **1.2.2 Средства телеметрии**

Конвертация информации о показателях физической среды в цифровые массивы данных, подлежащих передаче и обработке интернет вещами, осуществляется с помощью средств измерений.

Спектр используемых средств измерений весьма обширен, от аналоговых датчиков (освещённости, температуры, давления) до сложных измерительных комплексов. Принципиальной особенностью измерительных систем, используемых в рамках концепции интернета вещей, является их объединение в сеть взаимодействующих друг с другом и внешним миром устройств.

### **1.2.3 Средства обмена трафиком**

Современный спектр доступных технологий обмена данными представлен значительным многообразием проводных и беспроводных сетей.

При построении беспроводной сети интернета вещей основными требованиями, предъявляемыми к средствам передачи данных, являются:

- энергоэффективность;
- отказоустойчивость при работе в сложных климатических условиях;
- адаптивность к изменению условий прохождения радиосигнала.

В качестве стандарта, определяющего физический слой взаимодействия интернет вещей, как правило, используется IEEE 802.15.4.

В качестве проводных решений, используемых для IoT, наибольшее распространение получили технологии PLC, позволяющие выполнять обмен данными через сеть электроснабжения.

## **1.3 Области использования IoT**

### **1.3.1 Бытовые IoT решения**

Подавляющее большинство современных интернет вещей находит своё применение в потребительских решениях, используемых в быту для удалённого управления и мониторинга [20]: системы освещения, климат контроля, видеонаблюдения, устройства воспроизведения медиа контента и многие другие устройства, реализующие концепцию умного дома.

В качестве связующего звена для всех устройств умного дома выступают специализированные концентраторы, выпускаемые многими крупными вендорами.

Совокупность программно-аппаратных решений, объединяемых концентратором в систему управления умным домом, называют локальной экосистемой.

В качестве наиболее распространённых брендов, предлагающих современные решения для экосистем умного дома, можно отметить Google, Amazon, Apple, Samsung [28].

Кроме коммерческих, проприетарных решений, существует немало свободно распространяемых экосистем, использующих открытый исходный код: OpenHAB, Home Assistant, Domoticz [29].

### **1.3.2 IoT решения для здравоохранения**

IoT устройства находят активное применение в сфере здравоохранения для дистанционного мониторинга показателей здоровья и формирования сигналов оповещения в случае критического ухудшения анализируемых метрик (артериальное давление, пульс, температура, уровень сахара и другое).

Обеспечение возможности непрерывного автоматизированного мониторинга и логгирования показателей здоровья, позволяет врачам использовать более сложные и комплексные алгоритмы анализа состояния пациента, что в свою очередь играет немаловажную роль в назначаемых методах лечения хронических заболеваний.

### **1.3.3 IoT в промышленности**

IoT в промышленности становится неременным элементом современного производства, обеспечивая повышение производительности, снижение затрат и улучшение общей эффективности предприятий. Развитие стандартов безопасности, интеграция с искусственным интеллектом и продолжающийся технологический прогресс делают IoT всё более важным фактором в будущем промышленности.

Основные тактики применения IoT в промышленности:

- внедрение сенсоров и устройств сбора данных для непрерывного мониторинга состояния оборудования;

- прогнозирование отказов и плановое техобслуживание, что повышает эффективность и продолжительность службы оборудования;
- сбор данных о производственных процессах;
- анализ данных с целью улучшения эффективности, сокращения времени цикла и снижения затрат на производство;
- оптимизация цепочек поставок с использованием данных о запасах, транспорте и складировании;
- автоматизация процессов заказа и инвентаризации для уменьшения издержек;
- развертывание средств мониторинга для предотвращения несчастных случаев и обеспечения безопасности персонала;
- использование систем идентификации для контроля доступа к опасным зонам.

### **1.3.4 IoT в сельском хозяйстве**

Интернет вещей активно внедряется в сельское хозяйство, предоставляя фермерам инновационные технологии для повышения эффективности производства и оптимизации ресурсов.

Области применения IoT в сельском хозяйстве:

- для измерения уровня влажности, содержания питательных веществ и температуры почвы;
- оптимизация полива и внесения удобрений на основе полученных данных;
- внедрение беспилотных тракторов и дронов для автоматизированной обработки полей и мониторинга роста культур;
- использование аналитики данных для принятия решений по севооборотам и оптимизации посевных площадей;
- носимые устройства для мониторинга состояния здоровья скота;
- управление поголовьем на основе анализа данных;
- использование смарт-контроллеров для автоматизации систем полива, подачи удобрений и контроля климата в теплицах.

Преимущества, достигаемые за счёт внедрения IoT в сельское хозяйство:

- оптимизация использования ресурсов и мониторинг условий роста приводят к повышению урожайности;
- автоматизация процессов и оптимизация ресурсов снижают затраты на топливо, воду и удобрения;
- использование точного сельского хозяйства сокращает воздействие на окружающую среду, снижая использование химических веществ.

IoT в сельском хозяйстве преобразует традиционные методы, делая их более эффективными, устойчивыми и экономически выгодными. Внедрение технологий IoT в этот сектор обещает улучшить уровень жизни фермеров, обеспечивая стабильное и продуктивное развитие сельского хозяйства [54].

### **1.3.5 IoT в продовольственной сфере**

IoT становится катализатором инноваций в продовольственной отрасли, обеспечивая прозрачность, эффективность и безопасность на всех этапах цепочки поставок.

Области использования IoT в продовольственной отрасли:

- использование RFID-меток и сенсоров для отслеживания перемещения продуктов от поля до потребителя;
- обеспечение возможности точного определения происхождения и качества продукции;
- внедрение смарт-складов с автоматизированными системами мониторинга температуры, влажности и сроков годности;
- повышение эффективности управления запасами и снижение потерь продукции;
- использование сенсоров для непрерывного мониторинга параметров безопасности и качества продуктов;
- быстрое выявление и реагирование на потенциальные проблемы в целях предотвращения эпидемий и отзывов продукции;
- оптимизация маршрутов доставки с использованием данных о трафике и условиях дорог;
- улучшение точности прогнозирования времени доставки и уменьшение потерь в процессе транспортировки.

Выгоды от использования IoT в продовольствии:

- благодаря более эффективному управлению цепочкой поставок уменьшаются потери продукции, снижая количество отходов;
- повышение уровня доверия потребителей к продукции благодаря возможности отслеживать путь продукта от поля до витрины магазина;
- предотвращение фальсификации продуктов и обеспечения подлинности;
- развитие средств защиты данных и систем от кибератак для обеспечения безопасности всей цифровой инфраструктуры.

IoT становится неотъемлемой частью продовольственной промышленности, реформируя ее подход к управлению цепочкой поставок. Применение технологий IoT приводит к более эффективному, безопасному и ответственному производству продуктов, что приносит пользу как производителям, так и потребителям [58].

### **1.3.6 Инфраструктурные IoT решения**

IoT в инфраструктуре представляет собой внедрение технологий, объединяющих физические объекты и сетевые решения с целью оптимизации управления городской инфраструктурой и обеспечения устойчивого развития.

Сферы применения IoT в инфраструктуре:



- внедрение сенсоров и умных устройств для мониторинга и управления различными аспектами городской жизни, такими как освещение, транспорт, управление отходами и общественная безопасность;
- использование IoT для оптимизации движения транспорта, управления парковками и сбора данных о транспортных потоках;
- развитие систем умных общественных транспортных средств;
- развертывание сетей смарт-метров для мониторинга и оптимизации энергопотребления в зданиях и на городских территориях;
- интеграция возобновляемых источников энергии с умной сетью для сокращения выбросов углерода;
- использование сенсоров для мониторинга качества воды и обнаружения утечек в системах водоснабжения;
- разработка систем управления водными ресурсами с использованием данных IoT.

Использование IoT в инфраструктурных приложениях является ключевым элементом создания умных городов, способствующих эффективному управлению, снижению воздействия на окружающую среду и повышению качества жизни горожан [62].

### **1.3.7 IoT в энергетической отрасли**

Интеграция технологий IoT в энергетическую отрасль приводит к революции в управлении и мониторинге энергосистем, обеспечивая эффективность, устойчивость и экологическую устойчивость [64].

Области использования IoT в энергетике:

- внедрение смарт-сетей с умными счетчиками для мониторинга и управления энергопотреблением;
- автоматизация сетей для улучшения стабильности и реакции на изменения в потреблении;
- использование датчиков и мониторинга для предсказания отказов оборудования;
- минимизация времени простоя и оптимизация обслуживания.
- развертывание систем IoT для управления освещением, кондиционированием воздуха и другими системами в зданиях;

Преимущества, достигаемые благодаря IoT технологиям в энергетике:

- автоматизация энергопотребления для снижения расходов;
- оптимизация работы солнечных и ветровых электростанций с использованием данных IoT;
- повышение эффективности использования энергии и снижение операционных расходов;
- большая надежность сетей благодаря предсказательному техобслуживанию и автоматизации управления;
- интеграция возобновляемых источников энергии способствует сокращению выбросов углерода.

IoT преобразует энергетическую отрасль, делая ее более умной, эффективной и устойчивой. Развитие этой технологии продолжит формирование будущего энергетического ландшафта, где инновации и умные решения будут играть ключевую роль в управлении ресурсами и снижении воздействия на окружающую среду.

### **1.3.8 IoT в оборонной отрасли**

Внедрение технологий IoT в оборонной отрасли приводит к преобразованию военной стратегии, обеспечивая современные решения для обеспечения безопасности и эффективности в оборонных операциях [71].

Тактики задействования IoT в обороне:

- использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и датчиков для сбора разведывательной информации в реальном времени;
- улучшение обзора боевой обстановки и быстрое принятие решений на основе данных IoT;
- внедрение сенсоров и мониторинга в боевую технику для предотвращения отказов и оптимизации техобслуживания;
- умные системы управления, повышающие эффективность военной техники;
- разработка систем обнаружения и предотвращения кибератак на оборонные сети;
- использование IoT для координации и автоматизации боевых операций;
- умные системы управления силами и средствами для повышения эффективности боевых действий.

Достигаемые преимущества:

- более точные данные и автоматизированные системы, повышающие эффективность боевых операций;
- улучшение безопасности военнослужащих за счет технологий, предотвращающих опасные ситуации;
- минимизация рисков при принятии стратегических решений с использованием точных данных от сенсоров и датчиков.

IoT в оборонной отрасли предоставляет передовые инструменты для обеспечения национальной безопасности и эффективности военных операций. Однако, в связи с повышенными требованиями к безопасности, внедрение технологий IoT в обороне требует не только инноваций, но и внимания к защите от киберугроз и другим аспектам безопасности.

## 2 Обзор современных беспроводных технологий

### 2.1 Типы беспроводных сетей

Современные беспроводные сети можно условно разделить перечисленные ниже типы:

*а) WPAN (Wireless Personal Area Network) беспроводные персональные сети:*

WPAN представляет собой сеть, охватывающую небольшие личные области, обычно в пределах нескольких метров.

Основные технологии WPAN включают Bluetooth и Zigbee.

Bluetooth обеспечивает краткодистанционную передачу данных между устройствами, такими как смартфоны, наушники и клавиатуры.

Zigbee широко применяется в системах умного дома и умных городов, обеспечивая связь для устройств IoT;

*б) WLAN (Wireless Local Area Network) беспроводные локальные сети:*

WLAN предоставляет беспроводной доступ в локальных сетях с более широким охватом, часто до нескольких сотен метров.

Стандарт Wi-Fi (802.11) является ключевой технологией WLAN. Сети Wi-Fi широко распространены в домах, офисах, общественных местах и предоставляют высокоскоростной доступ в интернет.

Стандарт Wi-Fi 6 (802.11ax) предоставляет улучшенную производительность в условиях высокой загрузки сети.;

*в) WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) беспроводные сети районов:*

WMAN представляет собой беспроводные сети, ориентированные на определенные жилые районы или районы города.

В качестве примеров WMAN сетей можно привести Wi-SUN и ZigBee-NAN, которые обеспечивают долгосрочную связь на значительные расстояния с умеренным энергопотреблением. Применяется в системах умных городов, сельском хозяйстве и других областях, где требуется связь с большим охватом;

*г) WWAN (Wireless Wide Area Network) беспроводные глобальные сети:*

WWAN предоставляет беспроводной доступ в широких географических областях, охватывая национальные и мировые масштабы.

Мобильные сети, такие как 4G LTE и 5G, являются ключевыми технологиями WWAN, предоставляя мобильную связь и интернет в движении. 5G внедряет более высокие скорости передачи данных, низкую задержку и увеличенную емкость сети.

В рамках WWAN выделяется подкатегория LPWAN (Low Power Wide Area Network). Эти технологии обеспечивают долгосрочную связь для интернета вещей (IoT) с минимальным энергопотреблением. Применение

LPWAN распространено в системах мониторинга и управления, где требуется связь на больших расстояниях с длительным сроком службы батарей.

К наиболее распространённым представителям LPWAN сетей можно отнести LoRa и SIGFOX, сравнительному анализу которых посвящены следующие подразделы проекта.

Ниже показаны распространённые технологии, реализующие стандарты перечисленных выше беспроводных сетей, а также достижимые ими дальности связи (Рисунок 1).

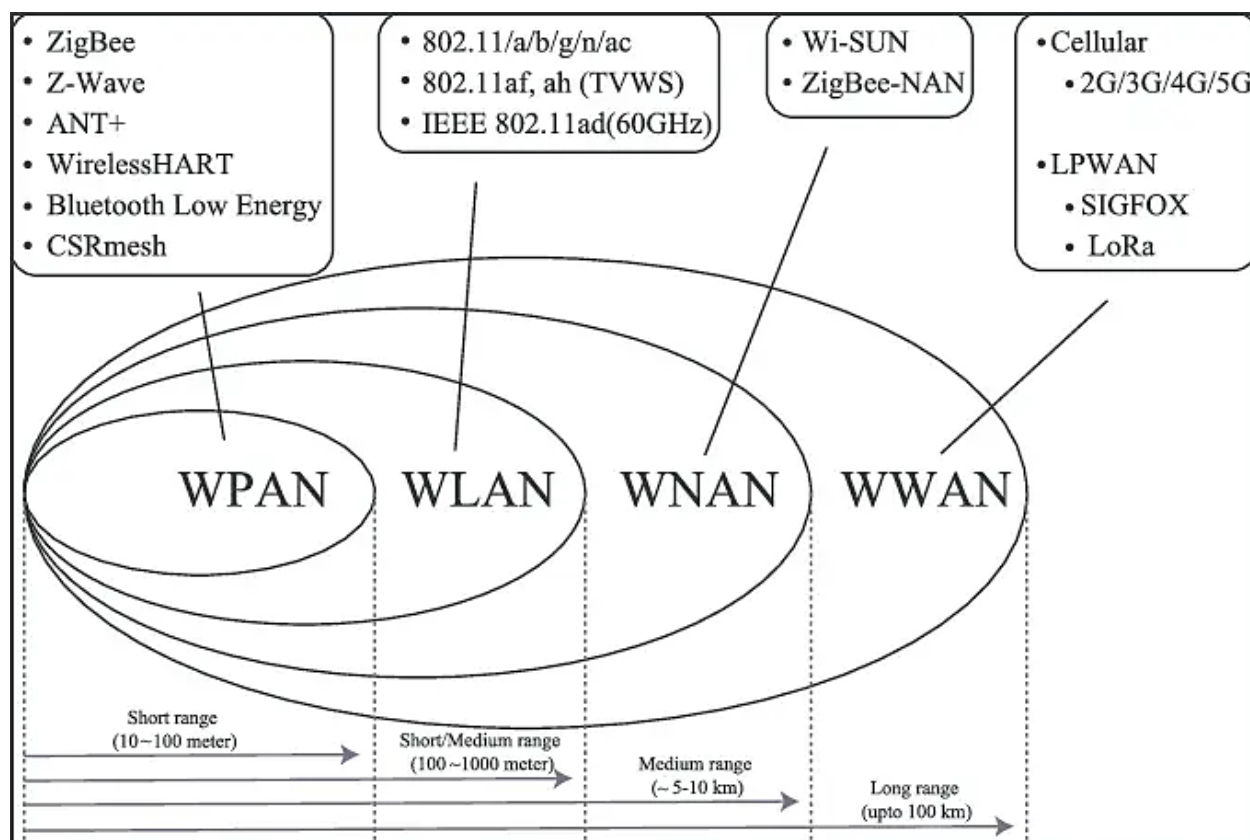


Рисунок 1 – Технологии беспроводных сетей

## 2.2 LPWAN технологии беспроводной связи

### 2.2.1 Общие сведения о LPWAN сетях

LPWAN (*Low-power Wide-area Network* – энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия) – представляет собой эволюцию беспроводных технологий, ориентированных на обеспечение связности для интернета вещей (IoT) в условиях, требующих дальнейшей передачи данных при минимальном энергопотреблении устройств. Данный доклад рассмотрит ключевые аспекты LPWAN, его технологии, применение и влияние на различные отрасли.

Основной принцип передачи данных в технологии LPWAN на физическом уровне опирается на характеристику радиосистем, а именно возрастание энергетических показателей, что приводит к увеличению дальности связи при снижении скорости передачи данных. Чем менее высока битовая скорость, тем более энергоэффективна каждая передаваемая единица информации, что обеспечивает более легкое выделение её на фоне шумов в приемной части системы. Таким образом, низкая скорость передачи данных способствует расширению дальности их приема.

LPWAN сегодня привлекает внимание различных отраслей благодаря своей способности обеспечивать эффективную связь для интернета вещей (IoT) с низким энергопотреблением и дальним охватом.

Сферы применения LPWAN охватывают широкий спектр отраслей, привнося инновации в мир технологий и бизнеса. Эффективное использование низкоэнергетических сетей LPWAN в этих областях открывает новые перспективы для умных решений, оптимизации процессов и повышения общей эффективности.

Перечисленные ниже ключевые особенности технологий LPWAN делают их привлекательными для различных сценариев использования, таких как сельское хозяйство, умные города, промышленность и здравоохранение:

- LPWAN оптимизирована для минимального расхода энергии на передачу и прием данных, что позволяет устройствам работать на батарейках или других источниках питания в течение длительного времени;

- технология LPWAN обеспечивает значительный радиус действия, даже в условиях, где сигнал должен преодолевать преграды или проникать в глубокие внутренние помещения;

- развитие стандартов с открытыми лицензиями (например, LoRaWAN) и использование недорогих компонентов делают LPWAN более доступной с точки зрения затрат;

- технология LPWAN идеально подходит для связи устройств Интернета Вещей, где необходима надежная и долгосрочная связь для сенсоров, устройств мониторинга и других IoT-устройств;

- некоторые варианты LPWAN, такие как LoRaWAN, основаны на открытых стандартах, что способствует их распространению и совместимости между различными поставщиками оборудования;

– LPWAN использует эффективные методы доступа к радиоканалу, что позволяет обеспечивать связь для большого числа устройств с минимальными помехами и коллизиями.

Ниже продемонстрировано сравнение LPWAN с другими беспроводными технологиями (Рисунок 2).

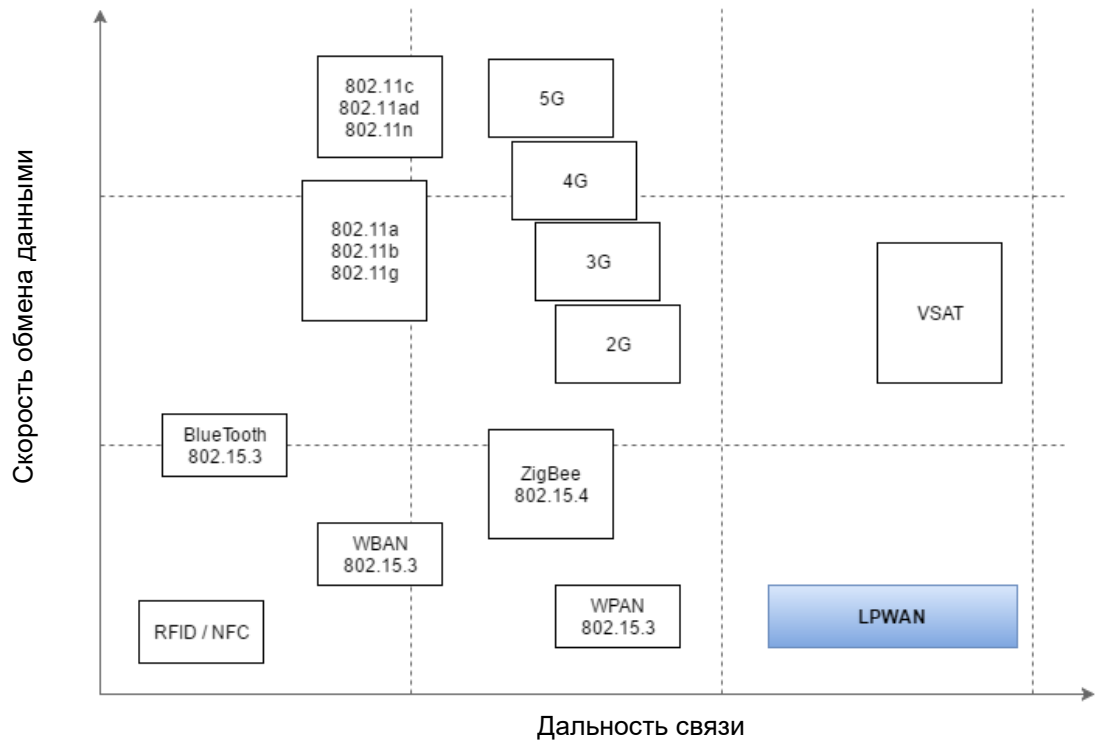


Рисунок 2 – Сравнение LPWAN с другими беспроводными технологиями

### 2.2.2 SIGFOX технология

Sigfox – сеть Интернета вещей, использующая узкополосный протокол LPWAN и оперирующая в нелицензированном радиочастотном диапазоне. Технология разработана в 2009 г. в Тулузе, Франция.

Архитектура сети позволяет базовым станциям передавать сигналы на больших расстояниях с минимальным влиянием шумов на сигналы.

Технология Sigfox комплементарна технологиям Bluetooth, GPS, 2G/3G/4G и Wi-Fi.

Открытый стандарт связи Sigfox позволяет обеспечить локализацию и импортозамещение оборудования Интернета Вещей.

Для передачи данных SigFox использует ультра-узкую полосу частот (Ultra- NarrowBand, UNB) с двоично-фазовой манипуляцией (BPSK), а для кодирования данных меняет фазу несущей радиоволны. Это позволяет уменьшить уровень шума на принимающей стороне, следовательно, сделать принимающие устройства более дешевыми.

Радиус действия Sigfox составляет 30-50 км (3-10 км в зашумленных и труднодоступных районах).

Срок службы устройств без замены батареи: до 10 лет в зависимости от типа устройства и режима передачи данных.

Используемые частоты: 868 МГц (Европа) и 902 МГц (США).

Топология сети: звезда (базовая станция, к которой подключаются конечные точки).

Существующий стандарт SigFox определяет максимальное количество сообщений от конечного устройства в день: 140 сообщений, при этом каждое сообщение должно быть размером не более 12 байт (исключая заголовок сообщения и информацию о передаче). Количество сообщений, исходящих от базовой станции до конечного устройства: 4 сообщения в день с полезной нагрузкой 8 байт.

#### **Сфера применения SIGFOX:**

– умные города: SIGFOX может использоваться для создания инфраструктуры умных городов, обеспечивая связь между различными устройствами и сенсорами для мониторинга и управления городской инфраструктурой;

– энергетика: в области энергетики SIGFOX может применяться для мониторинга и управления сетями умных счетчиков и другими устройствами, связанными с энергопотреблением;

– сельское хозяйство: в сельском хозяйстве технология SIGFOX может использоваться для мониторинга условий почвы, контроля состояния растений и животных, а также для управления автополивом;

– промышленность: применение SIGFOX в промышленности может включать в себя мониторинг состояния оборудования, отслеживание инвентаря и автоматизацию производственных процессов.

### **Преимущества SIGFOX:**

- реализация проектов в отсутствии традиционных беспроводных сетей связи;
- возможность быстрого и недорогого развертывания сети SIGFOX по запросу;
- глобальный охват/отсутствие роуминга;
- низкая совокупная стоимость владения, высокий срок службы батареи и масштабируемость;
- высокая устойчивость к глушению сигнала и простота скрытой установки без проводов будет особенно полезна охраняемым предприятиям.

### **Недостатки SIGFOX:**

- ограниченный объем данных: поскольку SIGFOX предоставляет ограниченный объем данных для передачи (всего 12 байт), не все типы устройств и приложений могут быть эффективно обслужены этой технологией;
- не подходит для высокоскоростных приложений;
- радиопrotocol работает с нелицензируемыми частотами, что может не подходить для определенных приложений, так как они должны контролировать используемые радиочастоты.
- отсутствие двусторонней связи, что приводит к тому, что передаваемые сообщения не подтверждаются

В целом SIGFOX представляет собой интересную технологию для конкретных применений IoT, где низкое энергопотребление и широкий радиус покрытия имеют решающее значение. Однако перед выбором этой технологии следует внимательно оценить требования конкретного приложения и сравнить их с возможностями SIGFOX и других доступных LPWAN решений.



## 2.2.3 LoRa технология

LoRa (Long Range) – технология передачи данных на большие расстояния с минимальными затратами энергии. Энергоэффективность устройств с модулем передачи данных LoRa позволяет создавать конечные устройства, работающие 3, 5 и 10 лет, передавая данные до 20 км.

Semtech – владелец технологии LoRa. И если LoRa — это технология и метод модуляции, то LoRaWAN – это открытый протокол для сетей, обеспечивающий взаимодействие физических устройств LoRa, и связывающий с сетевым оборудованием в IP сетях (интернет сетях).

LoRaWAN состоит из конечных устройств, будь то датчики влажности почвы, датчики заполненности мусорных баков, умные счетчики или любые другие устройства.

Можно не использовать протокол LoRaWAN, если соединения уровня точка-точка будет являться достаточным в архитектуре системы, например, когда требуется развернуть локальную сеть предприятия.

Alliance LoRa заключил соглашения с представителями радиочастотных регуляторов в разных странах об использовании частотного диапазона. Разрешённые параметры LoRa устройств в зависимости от региона использования изложены ниже (Таблица 1).

Таблица 1 – Частотные диапазоны LoRa

Параметр	Регион		
	Европа	Северная Америка	Россия
Частотный диапазон, МГц	863 – 870	902 – 928	864 – 865,5; 868,7 – 869,2
Максимальное количество каналов	35	80	8
Ширина спектра радиосигнала, кГц	125/250	125/500	125
Мощность передачи, дБм	14	27	14
Фактор расширения спектра SF (Spreading Factor)	7-12	7-10	7-12

Для решения различных задач и применений в сети LoRaWAN предусмотрено три класса конечных устройств:

– двунаправленные конечные устройства «класса А» (Bi-directional end-devices, Class A). Конечные устройства «класса А» позволяют организовать двунаправленный обмен. Причем связь может инициировать только конечное устройство, после чего выделяются два временных окна, в течение которых ожидается ответ от сети. Интервал передачи планируется конечным устройством на основе собственных потребностей в связи с небольшими случайными временными флуктуациями (протокол типа ALOHA). Конечные устройства «класса А» применяются в приложениях, где передача данных от сети возможна только как ответная

реакция на получения данных от конечного устройства и требуется максимальное время работы от автономного источника питания.

- двунаправленные конечные устройства «класса Б» (Bi-directional end-devices, Class B) в дополнение к функциям устройств «класса А», открывают дополнительные окна приема по расписанию. Для того, чтобы открыть окно приема, конечное устройство синхронизируется по специальным сигналам от шлюза (по маякам – iBeacon). Это позволяет сети знать время, когда конечное устройство готово принимать данные.

- двунаправленные конечные устройства «класса С» с максимальным приемным окном (Bi-directional end-devices, Class C). Конечные устройства «класса С» имеют почти непрерывно открытое окно приема. Приемное окно закрывается только на время передачи данных. Этот тип конечных устройств подходит для задач, когда необходимо получать большие объемы данных и не требуется длительная работа от автономного источника питания.

В сети LoRaWAN обеспечивается конфиденциальность данных при прохождении всех задействованных в цепочке устройств, при этом содержимое пакета доступно только отправителю (конечному устройству) и получателю (приложению), для которого оно предназначено. Сетевой сервер оперирует данными в зашифрованном виде, производит аутентификацию и проверяет целостность каждого пакета, но при этом не имеет доступа к полезной нагрузке, т.е. к информации от подключенных сенсоров (за исключением использования нерекомендуемых сценариев, в которых шифрование полезной нагрузки выполняет сетевой сервер с использованием ключа NwkSKey, а не сервер приложений; в дальнейшем данный сценарий не рассматривается).

### **Сфера применения LoRa**

- умные города: в системах умных городов, где устройства собирают данные о трафике, качестве воздуха, управлении энергопотреблением и других параметрах, LoRa обеспечивает надежную связь.

- сельское хозяйство: в агротехнологиях, таких как мониторинг почвы, управление поливом и отслеживание животных, технология LoRa обеспечивает широкий радиус действия.

- промышленность: для мониторинга состояния оборудования, отслеживания инвентаря и управления производственными процессами.

### **Преимущества технологии LoRa**

- дальний диапазон действия: одним из ключевых преимуществ LoRa является возможность передачи данных на большие расстояния без значительной потери качества сигнала.

- низкое энергопотребление: устройства, использующие LoRa, могут работать на небольших батареях в течение длительного времени, что особенно важно для устройств IoT, установленных в отдаленных местах.

– низкая стоимость устройств: разработка и производство устройств на базе LoRa относительно дешевы, что делает эту технологию доступной для широкого спектра приложений.

### **Недостатки технологии LoRa**

– низкая пропускная способность: по сравнению с некоторыми другими беспроводными технологиями, LoRa имеет ограниченную пропускную способность, что может стать ограничивающим фактором для приложений с высокими требованиями к скорости передачи данных.

– нелицензированные радиосети: LoRa работает в нелицензионных радиосетях., и по мере роста устройств LoRa и сетевых развертываний, могут возникать помехи на этом ограниченном наборе частот.

– безопасность: сетевой уровень LoRa и прикладной уровень генерируются из одного и того же корневого ключа и случайного числа и не изолированы друг от друга. Следовательно, существуют риски утечки конфиденциальности данных и подделки данных из-за утечки закрытого ключа.

В целом, технология LoRa представляет собой важное решение для беспроводной связи в области Интернета вещей. Ее дальний диапазон действия, низкое энергопотребление и относительная дешевизна делают ее привлекательным вариантом для различных применений. Несмотря на некоторые ограничения, такие как низкая пропускная способность, технология LoRa успешно развивается в мире современных беспроводных коммуникаций, способствуя развитию Интернета вещей.

## 2.2.4 Сравнительный анализ SIGFOX и LoRa

SIGFOX и LoRa (Long Range) представляют собой два похожих по назначению протокола передачи данных, разработанных для интернета вещей. Оба они предоставляют возможность долгосрочной беспроводной связи, но существуют заметные различия между ними.

### **Диапазон частот:**

**SIGFOX:** Использует уникальные частотные диапазоны для связи (868 МГц в Европе, 902 МГц в США). Однако ограниченный диапазон может ограничивать использование в некоторых регионах.

**LoRa:** Работает в нелицензионных диапазонах частот (433 МГц, 868 МГц, 915 МГц), что позволяет ему быть более гибким в различных регионах мира.

### **Технология модуляции:**

**SIGFOX:** Применяет узкополосную модуляцию (UNB), что обеспечивает хорошую устойчивость к помехам, но ограничивает скорость передачи данных до 100 бит/с.

**LoRa:** Использует широкополосную частотную модуляцию (spread spectrum), обеспечивая более высокую пропускную способность (от нескольких килобит в секунду до нескольких десятков килобит).

### **Потребление энергии:**

**SIGFOX:** Известен своей низкой энергопотребностью, что делает его подходящим для устройств с ограниченными ресурсами питания.

**LoRa:** Также имеет низкое энергопотребление, что позволяет использовать устройства на батарейках в течение длительного времени.

### **Стоимость использования:**

**SIGFOX:** Обычно предоставляет услуги на основе подписки, что может сделать его более предсказуемым с точки зрения затрат.

**LoRa:** Может быть дешевле в использовании, особенно в случаях, когда не требуется постоянное соединение и данные передаются редко.

### **Дальность связи:**

**SIGFOX:** Имеет дальность связи в пределах нескольких десятков километров, что делает его подходящим для широкого охвата.

**LoRa:** Также обеспечивает долгий диапазон связи, но фактическая дальность может зависеть от многих факторов, таких как препятствия и условия окружающей среды.

Оба протокола имеют свои преимущества и ограничения, и выбор между ними зависит от конкретных требований проекта IoT. SIGFOX подходит для простых сценариев с низкой пропускной способностью, в то время как LoRa может быть более гибким для более сложных приложений, требующих высокой пропускной способности и гибкости в выборе частоты.

Более подробная сравнительная характеристика, включающая в себя больше параметров для сравнения между протоколами SIGFOX и LoRa, представлена ниже (Таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение SIGFOX с LoRa

<b>Характеристика</b>	<b>SIGFOX</b>	<b>LoRa</b>
Диапазон частот	868 МГц в Европе, 902 МГц в США	Нелицензионные частоты (433 МГц, 868 МГц, 915 МГц)
Технология модуляции	Узкополосная модуляция (UNB)	Широкополосная частотная модуляция
Пропускная способность	Ограничена до 100 бит/с	До 38 кбит/с
Чувствительность	-142 дБм	-148 дБм (при 125 кГц) -137 дБм (при 250 кГц)
Потребление энергии	Низкое	Низкое
Размер сообщений	Ограничен до 12 байт	До 512 кбайт
Сложность сетевой архитектуры	Централизованная	Децентрализованная (сеть LoRaWAN)
Способность к маршрутизации	Отсутствует	Поддерживается (в сети LoRaWAN)
Гибкость в настройке	Ограниченная	Высокая
Дальность связи	До нескольких десятков километров	

### **3 Разработка схемы электрической принципиальной радиомодема**

#### **4 Трассировка печатной платы радиомодема**

## **5 Разработка управляющего ПО радиомодема**



## **6 Разработка прикладного ПО обмена трафиком через Ethernet интерфейс радиомодема**

## **7 Результаты трассовых испытаний радиомодема**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в ходе разработки анализ технических возможностей современных технологий беспроводной связи позволяет сделать вывод о том, что с точки зрения оптимального баланса между энергопотреблением, скоростью обмена, используемым спектром частот, бюджетом канала связи и доступностью аппаратных решений, наиболее предпочтительным средством радиотелеметрии для IoT устройств является технология LoRa.

Технология и способ модуляции LoRa характеризуется рядом преимуществ: высокой чувствительностью приёмного устройства, низкой восприимчивостью к эфирному шуму и толерантностью к дрейфу опорных частот, формируемых кварцем или осциллятором. Последнее преимущество позволяет применять бюджетные формирователи опорной частоты.

На сегодняшний день LoRa является одной из самых универсальных технологий, принадлежащей к категории несотовых стандартов. Технология поддерживается консорциумом LoRa Alliance, состоящим более чем из 500 компаний, включая Cisco, IBM, SK Telecom и др., что способствует её непрерывному развитию и совершенствованию.

Результаты эмпирических прогонов тестового массива данных через натуральные образцы разработанных устройств радиотелеметрии свидетельствуют о возможности корректной обработки сигнала, принимаемого на 21 дБ ниже уровня шума (уровень полезного сигнала более чем в 100 ниже уровня шума).

Подобным результатом не может похвастаться ни одна из других, существующих на сегодняшний день технологий беспроводной передачи данных.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Internet Of Things (англ.). Gartner IT glossary. Gartner (5 мая 2012). – «The Internet of Things is the network of physical objects that contain embedded technology to communicate and sense or interact with their internal states or the external environment.».
- 2 Kevin Ashton. That 'Internet of Things' Thing. In the real world, things matter more than ideas. (англ.). RFID Journal (22 июня 2009). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.
- 3 Hung LeHong, Jackie Fenn. Key Trends to Watch in Gartner 2012 Emerging Technologies Hype Cycle (англ.). Forbes (18 сентября 2012). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.
- 4 Черняк, 2012, «...распространение беспроводных сетей, активный переход на IPv6 и плюс к этому рост популярности облаков и появление группы технологий межмашинного взаимодействия (Machine to Machine, M2M) постепенно перемещают Интернет вещей в практическую плоскость».
- 5 Альбина Ильшатовна Киреева. "Интернет Вещей" И Области Его Использования // Инновационное Развитие. – 2017. – Вып. 6 (11). – ISSN 2500-3887.
- 6 Черняк, 2012, «Этот термин предложил в 1999 году Кевин Эштон, один из первых энтузиастов, увлекшихся RFID, а сейчас возглавляющий исследовательский центр Auto-ID Center в Массачусетском технологическом институте».
- 7 Эштон, 2009, «Linking the new idea of RFID in P&G's supply chain to the then-red-hot topic of the Internet was more than just a good way to get executive attention».
- 8 Neil Gershenfeld, Raffi Krikorian, Danny Cohen. The Internet of Things (англ.). Scientific American, Oct, 2004 (1 октября 2004). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.
- 9 NIC, 2008, «Individuals, businesses, and governments are unprepared for a possible future when Internet nodes reside in such everyday things as food packages, furniture, paper documents, and more... But to the extent that everyday objects become information-security risks, the IoT could distribute those risks far more widely than the Internet has to date».
- 10 Dave Evans. The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything (англ.). Cisco White Paper. Cisco Systems (11 апреля 2011). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.
- 11 The 2nd Annual Internet of Things 2010 (англ.). Forum Europe (1 января 2010). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.
- 12 The 3rd Annual Internet of Things 2011 (англ.). Forum Europe (1 января 2011). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.
- 13 Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, Sateesh Addepalli. Fog Computing and Its Role in the Internet of Things (англ.). SIGCOMM'2012. ACM

(19 июня 2012). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.

14 Леонид Черняк. Платформа Интернета вещей. Открытые системы. СУБД, №7, 2012. Открытые системы (26 сентября 2012). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано 24 января 2013 года.

15 Hung LeHong. Hype Cycle for the Internet of Things, 2012 (англ.). Hype Cycles. Gartner (27 июля 2012). Дата обращения: 30 ноября 2012. Архивировано из оригинала 24 января 2013 года.

16 Zach Shelby, Carsten Bormann. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet - Part 1: Why 6LoWPAN? (англ.). EE Times (23 мая 2011). Дата обращения: 1 января 2013. Архивировано 24 января 2013 года.

17 P. Burzacca, M. Mircoli, S. Mitolo, A. Polzonetti. “iBeacon” technology that will make possible Internet of Things // International Conference on Software Intelligence Technologies and Applications & International Conference on Frontiers of Internet of Things 2014. – Institution of Engineering and Technology, 2014. – doi:10.1049/cp.2014.1553.

18 Venkatesh Upadrista. IoT Business Strategy // IoT Standards with Blockchain. – Berkeley, CA: Apress, 2021. – С. 25–41.

19 Charith Perera, Chi Harold Liu, Srimal Jayawardena. The Emerging Internet of Things Marketplace From an Industrial Perspective: A Survey // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing. – 2015-12. – Т. 3, вып. 4. – С. 585–598. – ISSN 2168-6750. – doi:10.1109/tetc.2015.2390034.

20 Makhmoor Bashir, Anish Yousaf, Rajesh Verma. Disruptive Business Model Innovation: How a Tech Firm is Changing the Traditional Taxi Service Industry // Indian Journal of Marketing. – 2016-04-01. – Т. 46, вып. 4. – С. 49. – ISSN 0973-8703 0973-8703, 0973-8703. – doi:10.17010/ijom/2016/v46/i4/90530.

21 Won Min Kang, Seo Yeon Moon, Jong Hyuk Park. An enhanced security framework for home appliances in smart home // Human-centric Computing and Information Sciences. – 2017-03-05. – Т. 7, вып. 1. – ISSN 2192-1962. – doi:10.1186/s13673-017-0087-4.

22 Anthony Trollope. Lady Carbury at Home // The Way We Live Now. – Oxford University Press, 2016-07-14.

23 Jussi Karlgren, Lennart E. Fahlén, Anders Wallberg, Pär Hansson, Olov Ståhl. Socially Intelligent Interfaces for Increased Energy Awareness in the Home // The Internet of Things. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. – С. 263–275.

24 Samuel Greengard. The internet of things. – Cambridge, Massachusetts, 2015. – xviii, 210 pages c. – ISBN 978-0-262-52773-6, 0-262-52773-1.

25 Jesse Feiler. Exploring the HomeKit World as a Developer, Designer, or Device Manufacturer // Learn Apple HomeKit on iOS. – Berkeley, CA: Apress, 2016. – С. 73–87.

26 Introduction // The World According to XI. – I.B. Tauris, 2018.

27 Meagan M. Ehlenz. Making Home More Affordable: Community Land Trusts Adopting Cooperative Ownership Models to Expand Affordable Housing //

Journal of Community Practice. – 2018-06-06. – Т. 26, вып. 3. – С. 283–307. – ISSN 1543-3706 1070-5422, 1543-3706. – doi:10.1080/10705422.2018.1477082.

28 An Interview With Anton Krueger September 19, 2018 // Best "New" African Poets 2018 Anthology. – Mwanaka Media and Publishing, 2018-12-29. – С. 430–433.

29 Older Adult Suicides // Home Healthcare Now. – 2020. – Т. 38, вып. 3. – С. E5–E6. – ISSN 2374-4529. – doi:10.1097/nhh.0000000000000896.

30 Home Automation System // Embedded Systems and Robotics with Open Source Tools. – Boca Raton: CRC Press, 2016.: CRC Press, 2018-09-03. – С. 109–120.

31 B. K. Hensel, G. Demiris. Technologies for an Aging Society: A Systematic Review of “Smart Home” Applications // Yearbook of Medical Informatics. – 2008-08. – Т. 17, вып. 01. – С. 33–40. – ISSN 2364-0502 0943-4747, 2364-0502. – doi:10.1055/s-0038-1638580.

32 Santos J., Silva B. M. C., Rodrigues J. J. P. C., Casal J., Saleem K. Internet of things mobile getaway services for intelligent personal assistants (АНГЛ.) // Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. – 2015. – No. 17. – P. 311–316.

33 Raafat Aburukba, A. R. Al-Ali, Nourhan Kandil, Diala AbuDamis. Configurable ZigBee-based control system for people with multiple disabilities in smart homes // 2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS). – IEEE, 2016-03. – doi:10.1109/iccsii.2016.7462435.

34 Maurice Mulvenna, Anton Hutton, Vivien Coates, Suzanne Martin, Stephen Todd. Views of Caregivers on the Ethics of Assistive Technology Used for Home Surveillance of People Living with Dementia // Neuroethics. – 2017-01-24. – Т. 10, вып. 2. – С. 255–266. – ISSN 1874-5504 1874-5490, 1874-5504. – doi:10.1007/s12152-017-9305-z.

35 D. Romascanu, J. Schoenwaelder, A. Sehgal. Management of Networks with Constrained Devices: Use Cases. – RFC Editor, 2015-05.

36 Cristiano André da Costa, Cristian F. Pasluosta, Björn Eskofier, Denise Bandeira da Silva, Rodrigo da Rosa Righi. Internet of Health Things: Toward intelligent vital signs monitoring in hospital wards // Artificial Intelligence in Medicine. – 2018-07. – Т. 89. – С. 61–69. – ISSN 0933-3657. – doi:10.1016/j.artmed.2018.05.005.

37 R. S. H. Istepanian, S. Hu, N. Y. Philip, A. Sungoor. The potential of Internet of m-health Things “m-IoT” for non-invasive glucose level sensing // 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2011-08. – doi:10.1109/iembs.2011.6091302.

38 Melanie Swan. Sensor Mania! The Internet of Things, Wearable Computing, Objective Metrics, and the Quantified Self 2.0 // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2012-11-08. – Т. 1, вып. 3. – С. 217–253. – ISSN 2224-2708. – doi:10.3390/jsan1030217.

39 International Business Publications. Taiwan information strategy, internet and e-commerce development handbook: strategic ... information, programs,

regulations.. – [Place of publication not identified]: Intl Business Pubns Usa, 2015. – ISBN 1-5145-2102-4, 978-1-5145-2102-1.

40 Max Grell, Can Dincer, Thao Le, Alberto Lauri, Estefania Nunez Bajo. Fabric Electronics: Autocatalytic Metallization of Fabrics Using Si Ink, for Biosensors, Batteries and Energy Harvesting (Adv. Funct. Mater. 1/2019) // Advanced Functional Materials. – 2019-01. – Т. 29, вып. 1. – С. 1970002. – ISSN 1616-301X. – doi:10.1002/adfm.201970002.

41 Can Dincer, Richard Bruch, André Kling, Petra S. Dittrich, Gerald A. Urban. Multiplexed Point-of-Care Testing – xPOCT // Trends in Biotechnology. – 2017-08. – Т. 35, вып. 8. – С. 728–742. – ISSN 0167-7799. – doi:10.1016/j.tibtech.2017.03.013.

42 Gregory Camp. Spotify. <https://www.spotify.com/>. Retrieved 21 January 2015 // Journal of the Society for American Music. – 2015-08. – Т. 9, вып. 3. – С. 375–378. – ISSN 1752-1971 1752-1963, 1752-1971. – doi:10.1017/s1752196315000280. Архивировано 14 марта 2021 года.

43 Oliver Mack, Peter Veil. Platform Business Models and Internet of Things as Complementary Concepts for Digital Disruption // Phantom Ex Machina. – Cham: Springer International Publishing, 2016-10-20. – С. 71–85.

44 Ovidiu Vermesan, Peter Friess. Digitising the Industry - Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds // Digitising the Industry - Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds. – River Publisher, 2016. – С. 1–364.

45 Khizir Mahmud, Graham E. Town, Sayidul Morsalin, M.J. Hossain. Integration of electric vehicles and management in the internet of energy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018-02. – Т. 82. – С. 4179–4203. – ISSN 1364-0321. – doi:10.1016/j.rser.2017.11.004.

46 Mu Jing, Zhang Menghua. The application of the internet of things for transport logistics (англ.) // Транспортная инфраструктура сибирского региона. – 2015. – Vol. 2. – P. 223-227.

47 Shiv. H. Sutar, Rohan Koul, Rajani Suryavanshi. Integration of Smart Phone and IOT for development of smart public transportation system // 2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA). – IEEE, 2016-01. – doi:10.1109/iota.2016.7562698.

48 Chen Yang, Weiming Shen, Xianbin Wang. The Internet of Things in Manufacturing: Key Issues and Potential Applications // IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine. – 2018-01. – Т. 4, вып. 1. – С. 6–15. – ISSN 2333-942X. – doi:10.1109/msmc.2017.2702391.

49 Stefano Severi, Francesco Sottile, Giuseppe Abreu, Claudio Pastrone, Maurizio Spirito. M2M technologies: Enablers for a pervasive Internet of Things // 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – IEEE, 2014-06. – doi:10.1109/eucnc.2014.6882661.

50 Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, Marimuthu Palaniswami. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. – 2013-09. – Т. 29, вып. 7. – С. 1645–1660. – ISSN 0167-739X. – doi:10.1016/j.future.2013.01.010.

- 51 Lu Tan, Neng Wang. Future internet: The Internet of Things // 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICAETE). – IEEE, 2010-08. – doi:10.1109/icacte.2010.5579543.
- 52 Wei Zhang. Construction productivity improvement through industrialized construction methods. – The Hong Kong University of Science and Technology Library.
- 53 Keshnee Padayachee. The insider threat problem from a cloud computing perspective // Authentication Technologies for Cloud Computing, IoT and Big Data. – Institution of Engineering and Technology, 2019-03-11. – С. 241–272.
- 54 Precision agriculture technology for crop farming. – Boca Raton, FL, 2015. – 1 online resource c. – ISBN 1-4822-5107-8, 978-1-4822-5107-4, 978-1-4822-5108-1, 978-0-429-15968-8, 1-4822-5108-6, 0-429-15968-4, 978-1-000-21898-5, 1-000-21898-8.
- 55 AAAS-AMA, r/Science. AAAS AMA: Hi, we're researchers from Google, Microsoft, and Facebook who study Artificial Intelligence. Ask us anything! The Winnower. Дата обращения: 28 сентября 2021.
- 56 Zerina Kapetanovic, Deepak Vasisht, Jongho Won, Ranveer Chandra, Mark Kimball. Experiences Deploying an Always-on Farm Network // GetMobile: Mobile Computing and Communications. – 2017-08-04. – Т. 21, вып. 2. – С. 16–21. – ISSN 2375-0537 2375-0529, 2375-0537. – doi:10.1145/3131214.3131220.
- 57 Panagiotis Savvidis, George A. Papakostas. Remote Crop Sensing with IoT and AI on the Edge // 2021 IEEE World AI IoT Congress (AIIoT). – IEEE, 2021-05-10. – doi:10.1109/aiiot52608.2021.9454237.
- 58 S. Jagtap, S. Rahimifard. The digitisation of food manufacturing to reduce waste – Case study of a ready meal factory // Waste Management. – 2019-03. – Т. 87. – С. 387–397. – ISSN 0956-053X. – doi:10.1016/j.wasman.2019.02.017.
- 59 Mikko Kärkkäinen. Increasing efficiency in the supply chain for short shelf life goods using RFID tagging // International Journal of Retail & Distribution Management. – 2003-10-01. – Т. 31, вып. 10. – С. 529–536. – ISSN 0959-0552. – doi:10.1108/09590550310497058.
- 60 Sandeep Jagtap, Chintan Bhatt, Jaydeep Thik, Shahin Rahimifard. Monitoring Potato Waste in Food Manufacturing Using Image Processing and Internet of Things Approach // Sustainability. – 2019-06-05. – Т. 11, вып. 11. – С. 3173. – ISSN 2071-1050. – doi:10.3390/su11113173.
- 61 D. Bastos. Cloud for IoT - a Survey of Technologies and Security features of Public Cloud IoT solutions // Living in the Internet of Things (IoT 2019). – Institution of Engineering and Technology, 2019. – doi:10.1049/cp.2019.0168.
- 62 Mona Mourshed, Chinezi Chijioke, Michael Barber. How the worlds most improved school systems keep getting better // Voprosy Obrazovaniya/ Educational Studies. Moscow. – 2011. – Вып. 2. – С. 5–122. – ISSN 2412-4354 1814-9545, 2412-4354. – doi:10.17323/1814-9545-2011-2-5-122.
- 63 Prihatin Oktivasari. Android-based smart trash. – Author(s), 2018. – doi:10.1063/1.5042960.
- 64 J. Parello, B. Claise, B. Schoening, J. Quittek. Energy Management Framework. – RFC Editor, 2014-09.



- 65 Faheem Zafari, Ioannis Papapanagiotou, Konstantinos Christidis. Microlocation for Internet-of-Things-Equipped Smart Buildings // IEEE Internet of Things Journal. – 2016-02. – Т. 3, вып. 1. – С. 96–112. – ISSN 2327-4662. – doi:10.1109/jiot.2015.2442956.
- 66 ORDINARY MEETING: 8TH JUNE, 1923 // Journal of Molluscan Studies. – 1923-10. – ISSN 1464-3766. – doi:10.1093/oxfordjournals.mollus.a063815.
- 67 Shixing Li, Hong Wang, Tao Xu, Guiping Zhou. Application Study on Internet of Things in Environment Protection Field // Informatics in Control, Automation and Robotics / Dehuai Yang. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – Т. 133. – С. 99–106. – ISBN 978-3-642-25991-3, 978-3-642-25992-0. – doi:10.1007/978-3-642-25992-0\_13..
- 68 Most Popular from June/July // Neurology Now. – 2014-08. – Т. 10, вып. 4. – С. 7. – ISSN 1553-3271. – doi:10.1097/01.nnn.0000453345.09778.5d.
- 69 Jane K. Hart, Kirk Martinez. Toward an environmental Internet of Things // Earth and Space Science. – 2015-05. – Т. 2, вып. 5. – С. 194–200. – ISSN 2333-5084 2333-5084, 2333-5084. – doi:10.1002/2014ea000044.
- 70 Veronica Scuotto, Alberto Ferraris, Stefano Bresciani. Internet of Things: applications and challenges in smart cities. A case study of IBM smart city projects. // Business Process Management Journal. – 2016-03-04. – Т. 22, вып. 2. – ISSN 1463-7154 1463-7154, 1463-7154. – doi:10.1108/bpmj-05-2015-0074.
- 71 Котт Александр, Свами Анантрам, Вест Брюс. Интернет боевых вещей // Открытые Системы. Субд. – 2017. – Вып. 1. – ISSN 1028-7493.
- 72 Deepak K. Tosh, Sachin Shetty, Peter Foytik, Laurent Njilla, Charles A. Kamhoua. Blockchain-Empowered Secure Internet -of- Battlefield Things (IoBT) Architecture // MILCOM 2018 - 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). – IEEE, 2018-10. – doi:10.1109/milcom.2018.8599758.
- 73 Nof Abuzainab, Walid Saad. Dynamic Connectivity Game for Adversarial Internet of Battlefield Things Systems // IEEE Internet of Things Journal. – 2018-02. – Т. 5, вып. 1. – С. 378–390. – ISSN 2327-4662. – doi:10.1109/jiot.2017.2786546.
- 74 Ovidiu Vermesan, Joël Bacquet. Next Generation Internet of Things // Next Generation Internet of Things. – River Publisher, 2018. – С. 1–352.
- 75 Ye Hu, Anibal Sanjab, Walid Saad. Dynamic Psychological Game Theory for Secure Internet of Battlefield Things (IoBT) Systems // IEEE Internet of Things Journal. – 2019-04. – Т. 6, вып. 2. – С. 3712–3726. – ISSN 2372-2541 2327-4662, 2372-2541. – doi:10.1109/jiot.2018.2890431.
- 76 Philip L. Richardson. Drifters and Floats // Encyclopedia of Ocean Sciences. – Elsevier, 2019. – С. 63–70.
- 77 Geoff Giordano. Active Packaging Gets Smarter // Plastics Engineering. – 2015-06. – Т. 71, вып. 6. – С. 24–27. – ISSN 0091-9578. – doi:10.1002/j.1941-9635.2015.tb01373.x.
- 78 Paul Butler. Consumer Benefits and Convenience Aspects of Smart Packaging // Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008-04-11. – С. 233–245.

79 Ananya Sheth, Joseph V. Sinfield. Synthesis Study: Overview of Readily Available Culvert Inspection Technologies. – Purdue University, 2019-06-06.

80 Changsheng Chen, Mulin Li, Anselmo Ferreira, Jiwu Huang, Rizhao Cai. A Copy-Proof Scheme Based on the Spectral and Spatial Barcoding Channel Models // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2020. – Т. 15. – С. 1056–1071. – ISSN 1556-6021 1556-6013, 1556-6021. – doi:10.1109/TIFS.2019.2934861. Архивировано 6 октября 2021 года.

81 A. Sauer, M. Lenz, F.-W. Speckens, M. Stapelbroek, J. Ogrzewalla. Hochleistungsbatte­rie für Hybridfahrzeuge der Premiumklasse/High-Performance Battery for Premium Class Hybrid Vehicles // 41. Internationales Wiener Motorensymposium 22.-24. April 2020. – VDI Verlag, 2020. – С. I-350-I-367.

82 Amy Nordrum. The internet of fewer things [News] // IEEE Spectrum. – 2016-10. – Т. 53, вып. 10. – С. 12–13. – ISSN 0018-9235. – doi:10.1109/mspec.2016.7572524.

83 Ovidiu Vermesan. Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems. – Aalborg, Denmark, 2013. – 1 online resource (364 pages) c. – ISBN 978-87-92982-96-4, 87-92982-96-4.

84 Gérald Santucci. Research Roadmap for Future Internet Enterprise Systems // Lecture Notes in Business Information Processing. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – С. 3–4.

85 Friedemann Mattern, Christian Floerkemeier. From the Internet of Computers to the Internet of Things // Lecture Notes in Computer Science. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. – С. 242–259.

86 Agustina Calatayud. The Connected Supply Chain: Enhancing Risk Management in a Changing World. – Inter-American Development Bank, 2017-03.

87 cia memorandum intelligence lessons from the june uprisings in the gdr july 16 1953 secret cia. U.S. Intelligence on Europe, 1945-1995. Дата обращения: 11 октября 2021.

88 Chelsea Finn, Xin Yu Tan, Yan Duan, Trevor Darrell, Sergey Levine. Deep spatial autoencoders for visuomotor learning // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2016-05. – doi:10.1109/icra.2016.7487173.

89 Mehdi Mohammadi, Ala Al-Fuqaha, Sameh Sorour, Mohsen Guizani. Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Т. 20, вып. 4. – С. 2923–2960. – ISSN 2373-745X 1553-877X, 2373-745X. – doi:10.1109/comst.2018.2844341.

90 Mohammad Saeid Mahdavinejad, Mohammadreza Rezvan, Mohammadamin Barekatin, Peyman Adibi, Payam Barnaghi. Machine learning for internet of things data analysis: a survey // Digital Communications and Networks. – 2018-08. – Т. 4, вып. 3. – С. 161–175. – ISSN 2352-8648. – doi:10.1016/j.dcan.2017.10.002.

91 Cesare Alippi. Intelligence for embedded systems: a methodological approach. – Berlin, 2014. – 1 online resource (xix, 283 pages) c. – ISBN 978-3-319-05278-6, 3-319-05278-0, 978-3-319-05279-3, 3-319-05279-9, 978-3-319-38232-6, 3-319-38232-2.

92 Flavia C. Delicato, Adnan Al-Anbuky, Kevin I-Kai Wang. Editorial: Smart Cyber–Physical Systems: Toward Pervasive Intelligence systems // Future Generation Computer Systems. – 2020-06. – Т. 107. – С. 1134–1139. – ISSN 0167-739X. – doi:10.1016/j.future.2019.06.031.

93 Nane Kratzke, Peter-Christian Quint, Derek Palme, Dirk Reimers. Project Cloud TRANSIT - Or to Simplify Cloud-native Application Provisioning for SMEs by Integrating Already Available Container Technologies // European Space project on Smart Systems, Big Data, Future Internet - Towards Serving the Grand Societal Challenges. – SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2016. – doi:10.5220/0007902700030026.

94 Internet of things: challenges, advances, and applications. – Boca Raton, 2018. – 1 online resource (xvii, 418 pages) c. – ISBN 978-1-315-15500-5, 1-315-15500-1, 978-1-4987-7853-4, 1-4987-7853-4, 978-1-351-65105-9, 1-351-65105-6.

95 Abhik Chaudhuri. Internet of things, for things, and by things. – Boca Raton, FL, 2019. – 1 online resource (xxvii, 257 pages) c. – ISBN 978-1-315-20064-4, 978-1-351-77968-5, 1-315-20064-3, 1-351-77968-0.

96 Н. А. Верзун, О. С. Ипатов, М. О. Колбанёв. Интернет Вещей И Информационно-Технологическая Безопасность. – 2016. – С. 37–43.

97 Умное будущее. [www.kommersant.ru](http://www.kommersant.ru) (29 марта 2017). Дата обращения: 13 ноября 2021. Архивировано 13 ноября 2021 года.

98 Алексей Лагутенков. Тихая экспансия интернета вещей // Наука и жизнь. – 2018. – № 5. – С. 38–42. Архивировано 9 мая 2018 года.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(обязательное)  
LoRa Радиомодем. Схема электрическая принципиальная

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(обязательное)  
LoRa Радиомодем. Чертёж топологии печатной платы

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(обязательное)  
LoRa Радиомодем. Листинг исходного кода управляющей программы