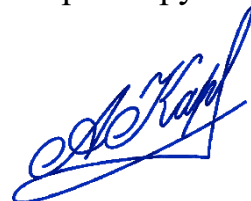


Министерство образования и науки Республики Казахстан
Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева

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

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Обзор концепции IoT (интернет вещей)	5
1.1 Общие сведения об IoT	5
1.2 Технологии IoT	6
1.2.1 Средства идентификации	6
1.2.2 Средства измерения	7
1.2.3 Средства передачи данных	7
1.3 Сферы применения IoT	8
1.3.1 Потребительские приложения	8
1.3.1.1 Умный дом	8
1.3.1.2 Уход за пожилыми людьми	9
1.3.2 Приложения для организаций	9
1.3.2.1 Медицина и здравоохранение	9
1.3.2.2 Транспорт	10
1.3.3 Промышленное применение	10
1.3.3.1 Производство	11
1.3.3.2 Сельское хозяйство	11
1.3.3.3 Продовольствие	12
1.3.4 Инфраструктурные приложения	12
1.3.4.1 Управление энергопотреблением	13
1.3.4.2 Мониторинг окружающей среды	13
1.3.4.3 Живая лаборатория	14
1.3.5 Военное применение	14
1.3.6 Оцифровка продукта	15
1.4 Тенденции IoT	15
1.4.1 Интеллект	16
1.4.2 Архитектура	17
1.5 Прогнозы и распространение IoT	18
2 Обзор современных беспроводных технологий	19
2.1 Типы беспроводных сетей	19
2.2 LPWAN технологии беспроводной связи	21
2.2.1 Общие сведения о LPWAN сетях	21
2.2.2 SIGFOX технология	23
2.2.3 LoRa технология	25
2.2.4 Сравнительный анализ SIGFOX и LoRa	28
3 Разработка схемы электрической принципиальной радиомодема	30
4 Трассировка печатной платы радиомодема	31
5 Разработка управляющего ПО радиомодема	32
6 Разработка прикладного ПО обмена трафиком через Ethernet интерфейс радиомодема	33
7 Результаты трассовых испытаний радиомодема	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	36

ПРИЛОЖЕНИЕ А LoRa Радиомодем. Схема электрическая принципиальная	45
ПРИЛОЖЕНИЕ Б LoRa Радиомодем. Чертёж топологии печатной платы.....	46
ПРИЛОЖЕНИЕ В LoRa Радиомодем. Листинг исходного кода управляющей программы.....	47

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].

Концепция сформулирована в 1999 году как осмысление перспектив широкого применения средств радиочастотной идентификации для взаимодействия физических предметов между собой и с внешним окружением. Наполнение концепции многообразным технологическим содержанием и внедрение практических решений для её реализации начиная с 2010-х годов считается устойчивой тенденцией в информационных технологиях [3], прежде всего, благодаря повсеместному распространению беспроводных сетей, появлению облачных вычислений, развитию технологий межмашинного взаимодействия, началу активного перехода на IPv6 [4] и освоению программно-определяемых сетей.

Концепция и термин [5] для неё впервые сформулированы основателем исследовательской группы *Auto-ID Labs* при Массачусетском технологическом институте Кевином Эштоном [6] в 1999 году на презентации для руководства Procter & Gamble. В презентации рассказывалось о том, как всеобъемлющее внедрение радиочастотных меток сможет видоизменить систему управления логистическими цепями в корпорации [7].

В 2004 году в *Scientific American* опубликована обширная статья [8], посвящённая «интернету вещей», наглядно показывающая возможности концепции в бытовом применении: в статье приведена иллюстрация, показывающая, как бытовые приборы (будильник, кондиционер), домашние системы (система садового полива, охранный система, система освещения), датчики (тепловые, датчики освещённости и движения) и «вещи» (например, лекарственные препараты, снабжённые идентификационной меткой) взаимодействуют друг с другом посредством коммуникационных сетей (инфракрасных, беспроводных, силовых и слаботочных сетей) и обеспечивают полностью автоматическое выполнение процессов (включают кофеварку, изменяют освещённость, напоминают о приёме лекарств, поддерживают температуру, обеспечивают полив сада, позволяют сберегать энергию и управлять её потреблением). Сами по себе представленные варианты домашней автоматизации не были новыми, но упор в публикации на объединении устройств и «вещей» в единую вычислительную сеть, обслуживаемую интернет-протоколами, и рассмотрение «интернета вещей»

как особого явления способствовали обретению концепцией широкой популярности [2].

В отчёте Национального разведывательного совета США (англ. *National Intelligence Council*) 2008 года «интернет вещей» фигурирует как одна из шести подрывных технологий, указывается, что повсеместное и незаметное для потребителей превращение в интернет-узлы таких распространённых вещей, как товарная упаковка, мебель, бумажные документы, может заметно повысить риски в сфере национальной информационной безопасности [9].

Период с 2008 по 2009 год аналитики корпорации Cisco считают «настоящим рождением „интернета вещей“», так как, по их оценкам, именно в этом промежутке количество устройств, подключённых к глобальной сети, превысило численность населения Земли [10], тем самым «интернет людей» стал «интернетом вещей».

С 2009 года при поддержке Еврокомиссии в Брюсселе ежегодно проводится конференция «Internet of Things» [11] [12], на которой представляют доклады еврокомиссары и депутаты Европарламента, правительственные чиновники из европейских стран, руководители таких компаний, как SAP, SAS Institute, Telefónica, ведущие учёные крупных университетов и исследовательских лабораторий.

С начала 2010-х годов «интернет вещей» становится движущей силой парадигмы «туманных вычислений» (англ. *fog computing*), распространяющей принципы облачных вычислений от центров обработки данных к огромному количеству взаимодействующих географически распределённых устройств, которая рассматривается как платформа «интернета вещей» [13] [14].

Начиная с 2011 года Gartner помещает «интернет вещей» в общий цикл хайпа новых технологий на этап «технологического триггера» с указанием срока становления более 10 лет, а с 2012 года периодически выпускается специализированный «цикл хайпа интернета вещей» [15].

1.2 Технологии IoT

1.2.1 Средства идентификации

Задействование в «интернете вещей» предметов физического мира, не обязательно оснащённых средствами подключения к сетям передачи данных, требует применения технологий идентификации этих предметов («вещей»). Хотя толчком для появления концепции стала технология RFID, но в качестве таких технологий могут использоваться все средства, применяемые для автоматической идентификации: оптически распознаваемые идентификаторы (штрихкоды, Data Matrix, QR-коды), средства определения местонахождения в режиме реального времени. При всеобъемлющем распространении «интернета вещей» принципиально обеспечить уникальность идентификаторов объектов, что, в свою очередь, требует стандартизации.

Для объектов, непосредственно подключённых к интернет-сетям, традиционный идентификатор – MAC-адрес сетевого адаптера, позволяющий

идентифицировать устройство на канальном уровне, при этом диапазон доступных адресов практически неисчерпаем (248 адресов в пространстве MAC-48), а использование идентификатора канального уровня не слишком удобно для приложений. Более широкие возможности по идентификации для таких устройств даёт протокол IPv6, обеспечивающий уникальными адресами сетевого уровня не менее 300 млн устройств на одного жителя Земли.

1.2.2 Средства измерения

Особую роль в интернете вещей играют средства измерения, обеспечивающие преобразование сведений о внешней среде в машиночитаемые данные, и тем самым наполняющие вычислительную среду значимой информацией. Используется широкий класс средств измерения, от элементарных датчиков (например, температуры, давления, освещённости), приборов учёта потребления (таких, как интеллектуальные счётчики) до сложных интегрированных измерительных систем. В рамках концепции «интернета вещей» принципиально объединение средств измерения в сети (такие, как беспроводные датчиковые сети, измерительные комплексы), за счёт чего возможно построение систем межмашинного взаимодействия.

Как особая практическая проблема внедрения «интернета вещей» отмечается необходимость обеспечения максимальной автономности средств измерения, прежде всего, проблема энергоснабжения датчиков. Нахождение эффективных решений, обеспечивающих автономное питание сенсоров (использование фотоэлементов, преобразование энергии вибрации, воздушных потоков, использование беспроводной передачи электричества), позволяет масштабировать сенсорные сети без повышения затрат на обслуживание (в виде смены батареек или подзарядки аккумуляторов датчиков).

1.2.3 Средства передачи данных

Спектр возможных технологий передачи данных охватывает все возможные средства беспроводных и проводных сетей.

Для беспроводной передачи данных особо важную роль в построении «интернета вещей» играют такие качества, как эффективность в условиях низких скоростей, отказоустойчивость, адаптивность, возможность самоорганизации. Основным интерес в этом качестве представляет стандарт IEEE 802.15.4, определяющий физический слой и управление доступом для организации энергоэффективных персональных сетей, и являющийся основой для таких протоколов, как ZigBee, WirelessHart, MiWi, 6LoWPAN, LPWAN.

Среди проводных технологий важную роль в проникновении «интернета вещей» играют решения PLC – технологии построения сетей передачи данных по линиям электропередачи, так как во многих приложениях присутствует доступ к электросетям (например, торговые автоматы, банкоматы, интеллектуальные счётчики, контроллеры освещения изначально подключены

к сети электроснабжения). 6LoWPAN, реализующий слой IPv6 как над IEEE 802.15.4, так и над PLC, будучи открытым протоколом, стандартизуемым IETF, отмечается как особо важный для развития «интернета вещей» [16].

1.3 Сферы применения IoT

Обширный набор приложений для устройств интернета вещей [17] часто делится на потребительские, коммерческие, промышленные и инфраструктурные пространства [18] [19].

1.3.1 Потребительские приложения

Все большая часть устройств интернета вещей создается для использования потребителями, включая подключенные транспортные средства, домашнюю автоматизацию, умную одежду, подключенное здравоохранение и приборы с возможностями удаленного мониторинга [20].

1.3.1.1 Умный дом

Устройства интернета вещей являются частью более широкой концепции домашней автоматизации, которая может включать освещение, отопление и кондиционирование воздуха, медиа-системы и системы безопасности, а также системы видеонаблюдения [21] [22]. Долгосрочные выгоды могут включать экономию энергии за счет автоматического отключения света и электроники или за счет информирования жителей дома об использовании [23].

Умный дом или автоматизированный дом может быть основан на платформе или концентраторах, которые управляют интеллектуальными устройствами и приборами [24]. Например, используя Apple HomeKit, производители могут управлять своими домашними продуктами и аксессуарами с помощью приложения на устройствах iOS, таких как iPhone и Apple Watch [25] [26]. Это может быть специальное приложение или собственные приложения iOS, такие как Siri. Это может быть продемонстрировано в случае Lenovo Smart Home Essentials, это линейка устройств для умного дома, которые управляются через приложение Apple Home или Siri без необходимости подключения к Wi-Fi [27]. Существуют также специализированные концентраторы для умного дома, которые предлагаются в качестве автономных платформ для подключения различных продуктов для умного дома, в том числе Amazon Echo, Google Home, Apple HomePod и Samsung SmartThings Hub [28]. В дополнение к коммерческим системам существует множество непатентованных экосистем с открытым исходным кодом, включая Home Assistant, OpenHAB и Domoticz [29] [30].

1.3.1.2 Уход за пожилыми людьми

Одним из ключевых применений умного дома является оказание помощи людям с ограниченными возможностями и пожилым людям. Эти домашние системы используют вспомогательные технологии для удовлетворения особых потребностей владельца [31]. Голосовое управление [32] может помочь пользователям с ограничениями зрения и подвижности, в то время как системы оповещения могут быть подключены непосредственно к кохлеарным имплантатам, которые носят пользователи с нарушениями слуха [33]. Они также могут быть оснащены дополнительными функциями безопасности. Эти функции могут включать датчики, которые отслеживают экстренные медицинские ситуации, такие как падения или судороги [34]. Технология умного дома, применяемая таким образом, может предоставить пользователям больше свободы и более высокое качество жизни.

1.3.2 Приложения для организаций

1.3.2.1 Медицина и здравоохранение

Устройства интернета вещей можно использовать для обеспечения удаленного мониторинга состояния здоровья и систем оповещения о чрезвычайных ситуациях. Эти устройства для мониторинга состояния здоровья могут варьироваться от мониторов артериального давления и сердечного ритма до современных устройств, способных контролировать специализированные имплантаты, такие как кардиостимуляторы, электронные браслеты Fitbit или усовершенствованные слуховые аппараты [35]. Некоторые больницы начали внедрять "умные кровати", которые могут определять, когда они заняты и когда пациент пытается встать. Он также может самостоятельно настраиваться для обеспечения надлежащего давления и поддержки пациента без ручного взаимодействия медсестер [36].

В жилых помещениях также могут быть установлены специализированные датчики для мониторинга здоровья и общего благополучия пожилых людей, а также для обеспечения надлежащего лечения и оказания помощи людям в восстановлении утраченной подвижности с помощью терапии [37]. Эти датчики создают сеть интеллектуальных датчиков, которые способны собирать, обрабатывать, передавать и анализировать ценную информацию в различных средах, таких как подключение домашних устройств мониторинга к больничным системам. Другие потребительские устройства для поощрения здорового образа жизни, такие как подключенные весы или носимые кардиомониторы, также доступны с IoT [38]. Платформы IoT для комплексного мониторинга состояния здоровья также доступны для родовых и хронических пациентов, помогая управлять жизненно важными показателями здоровья и повторяющимися потребностями в лекарствах [39].

Достижения в области методов изготовления электроники из пластика и ткани позволили создать сверхнизкие по стоимости, удобные в использовании

датчики IoMT. Эти датчики, наряду с необходимой электроникой RFID, могут быть изготовлены на бумаге или электронном текстиле для одноразовых сенсорных устройств с беспроводным питанием [40]. Были созданы приложения для медицинской диагностики на месте оказания медицинской помощи, где важна мобильность и низкая сложность системы [41].

По состоянию на 2018 год IoMT применялся не только в индустрии клинических лабораторий, но и в сфере здравоохранения и медицинского страхования. IoMT в отрасли здравоохранения в настоящее время позволяет врачам, пациентам и другим лицам, таким как опекуны пациентов, медсестры, семьи и т.д., быть частью системы, в которой записи пациентов сохраняются в базе данных, позволяя врачам и остальному медицинскому персоналу иметь доступ к информации о пациентах [42]. Кроме того, системы, основанные на IoT, ориентированы на пациента, что предполагает гибкость в отношении медицинских условий пациента. IoMT в страховой отрасли обеспечивает доступ к лучшим и новым типам динамической информации. Это включает в себя решения на основе датчиков, такие как биосенсоры, носимые устройства, подключенные медицинские устройства и мобильные приложения для отслеживания поведения клиентов. Это может привести к более точному андеррайтингу и новым моделям ценообразования [43].

Применение интернета вещей в здравоохранении играет фундаментальную роль в лечении хронических заболеваний, а также в профилактике заболеваний и борьбе с ними. Удаленный мониторинг становится возможным благодаря подключению мощных беспроводных решений. Подключение позволяет практикующим врачам собирать данные о пациентах и применять сложные алгоритмы для анализа данных о состоянии здоровья [44].

1.3.2.2 Транспорт

Интернет вещей может помочь в интеграции коммуникаций, управления и обработки информации в различных транспортных системах. Применение Интернета вещей распространяется на все аспекты транспортных систем (т.е. транспортное средство [45], инфраструктура и водитель или пользователь). Динамическое взаимодействие между этими компонентами транспортной системы обеспечивает связь между транспортными средствами и внутри них, интеллектуальное управление движением [45] [46], интеллектуальную парковку, электронные системы взимания платы, логистику и управление автопарком, управление транспортными средствами, безопасность и помощь на дорогах [47].

1.3.3 Промышленное применение

Промышленный интернет вещей, также известные как IIoT, получают и анализируют данные от подключенного оборудования, операционных технологий (OT), местоположений и людей. В сочетании с устройствами

мониторинга операционных технологий (ОТ) ПоТ помогает регулировать и контролировать промышленные системы. Кроме того, такая же реализация может быть реализована для автоматического обновления записей о размещении активов в промышленных хранилищах, поскольку размер активов может варьироваться от небольшого винта до всей запасной части двигателя, и неправильное размещение таких активов может привести к потере процентов рабочего времени и денег.

1.3.3.1 Производство

Интернет вещей позволяет также подключать различные производственные устройства, оснащенные функциями обнаружения, идентификации, обработки, связи, приведения в действие и создания сетей [48]. Сетевой контроль и управление производственным оборудованием, управление активами и ситуациями или управление производственными процессами позволяют использовать IoT для промышленных приложений и интеллектуального производства [49]. Интеллектуальные системы интернета вещей позволяют быстро производить и оптимизировать новые продукты, а также быстро реагировать на потребности в продуктах.

Цифровые системы управления для автоматизации управления технологическими процессами, инструменты оператора и системы служебной информации для оптимизации безопасности и охраны оборудования входят в компетенцию ПоТ [50]. IoT также может быть применен для управления активами с помощью прогнозного обслуживания, статистической оценки и измерений для обеспечения максимальной надежности [51]. Промышленные системы управления могут быть интегрированы с интеллектуальными сетями, что позволяет оптимизировать энергопотребление. Измерения, автоматизированное управление, оптимизация установок, управление охраной труда и безопасностью и другие функции обеспечиваются сетевыми датчиками.

В дополнение к общему производству, интернет вещей также используется для процессов индустриализации строительства [52].

1.3.3.2 Сельское хозяйство

Существует множество приложений интернета вещей в сельском хозяйстве [53], таких как сбор данных о температуре, количестве осадков, влажности, скорости ветра, зараженности вредителями и составе почвы. Эти данные могут быть использованы для автоматизации методов ведения сельского хозяйства, принятия обоснованных решений по улучшению качества и количества, минимизации рисков и отходов, а также для сокращения усилий, необходимых для управления посевами. Например, фермеры теперь могут контролировать температуру и влажность почвы издалека и даже применять данные, полученные с помощью Интернета вещей, для точных программ внесения удобрений [54]. Общая цель состоит в том,

чтобы данные с датчиков в сочетании со знаниями и интуицией фермера о его или её ферме могли помочь повысить производительность фермы, а также снизить затраты.

В августе 2018 года компания Toyota Tsusho начала партнерство с Microsoft по созданию инструментов для рыбоводства с использованием пакета приложений Microsoft Azure для технологий интернета вещей, связанных с управлением водными ресурсами. Разработанные частично исследователями из Университета Киндай, механизмы водяного насоса используют искусственный интеллект для подсчета количества рыбы на конвейерной ленте, анализа количества рыбы и определения эффективности потока воды на основе данных, предоставляемых рыбой [55]. Проект FarmBeats [56] от Microsoft Research, который использует телевизионное пустое пространство для подключения ферм, теперь также является частью Azure Marketplace [57].

1.3.3.3 Продовольствие

В последние годы широко изучалось использование приложений на основе Интернета вещей для улучшения деятельности в цепочке поставок продовольствия [58]. Внедрение технологии RFID в цепочку поставок продуктов питания привело к видимости запасов и их перемещения в режиме реального времени, автоматизированному подтверждению доставки, повышению эффективности логистики продуктов с коротким сроком годности, мониторингу окружающей среды, животноводства и холодильной цепи, и эффективная прослеживаемость [59]. Исследователи из Университета Лафборо на основе технологии интернета вещей разработали инновационную цифровую систему отслеживания пищевых отходов, которая поддерживала принятие решений в режиме реального времени для борьбы с проблемами пищевых отходов в производстве продуктов питания и сокращения их количества. Они также разработали полностью автоматизированную систему, основанную на обработке изображений, для отслеживания отходов картофеля на фабрике по упаковке картофеля [60]. В настоящее время IoT внедряется в пищевой промышленности для повышения безопасности пищевых продуктов, улучшения логистики, повышения прозрачности цепочки поставок и сокращения потерь [61].

1.3.4 Инфраструктурные приложения

Мониторинг и контроль функционирования устойчивой городской и сельской инфраструктуры, такой как мосты, железнодорожные пути, ветряные электростанции на суше и в море, является ключевым приложением Интернета вещей. Инфраструктура интернета вещей может использоваться для мониторинга любых событий или изменений в структурных условиях, которые могут поставить под угрозу безопасность и увеличить риск. Интернет вещей может принести пользу строительной отрасли за счет экономии затрат,

сокращения времени, повышения качества рабочего дня, безбумажного рабочего процесса и повышения производительности. Это может помочь в принятии более быстрых решений и сэкономить деньги благодаря анализу данных в режиме реального времени. Он также может быть использован для эффективного планирования работ по ремонту и техническому обслуживанию путем координации задач между различными поставщиками услуг и пользователями этих объектов. Устройства интернета вещей также могут использоваться для управления критически важной инфраструктурой, такой как мосты, для обеспечения доступа к судам. Использование устройств интернета вещей для мониторинга и эксплуатации инфраструктуры, вероятно, улучшит управление инцидентами и координацию реагирования на чрезвычайные ситуации, а также качество обслуживания, время безотказной работы и снизит затраты на эксплуатацию во всех областях, связанных с инфраструктурой [62]. Даже такие области, как управление отходами, могут извлечь выгоду из автоматизации и оптимизации, которые могут быть реализованы с помощью Интернета вещей [63].

1.3.4.1 Управление энергопотреблением

Значительное количество энергопотребляющих устройств (например, лампы, бытовая техника, двигатели, насосы и т.д.) уже интегрируют подключение к Интернету, что позволяет им взаимодействовать с коммунальными службами не только для балансировки выработки электроэнергии, но и помогает оптимизировать потребление энергии в целом. Эти устройства обеспечивают удаленное управление пользователями или централизованное управление через облачный интерфейс и позволяют выполнять такие функции, как планирование (например, удаленное включение или выключение систем отопления, управление духовками, изменение условий освещения и т.д.). Интеллектуальная сеть - это приложение IoT на стороне утилиты; системы собирают и обрабатывают информацию, связанную с энергией и электроэнергией, для повышения эффективности производства и распределения электроэнергии [64]. Используя устройства, подключенные к Интернету с помощью усовершенствованной измерительной инфраструктуры (AMI), предприятия электроэнергетики не только собирают данные от конечных пользователей, но и управляют устройствами автоматизации распределения, такими как трансформаторы [35].

1.3.4.2 Мониторинг окружающей среды

Приложения IoT для экологического мониторинга обычно используют датчики для содействия охране окружающей среды [65] путем мониторинга качества воздуха [66] или воды, атмосферных или почвенных условий [67] и могут даже включать такие области, как мониторинг перемещений диких животных и их мест обитания [68]. Разработка устройств с ограниченными ресурсами, подключенных к Интернету, также означает, что другие

приложения, такие как системы раннего предупреждения о землетрясениях или цунами, также могут использоваться экстренными службами для оказания более эффективной помощи. Устройства интернета вещей в этом приложении обычно охватывают большую географическую область и также могут быть мобильными. Утверждалось, что стандартизация, которую IoT привносит в беспроводное зондирование, произведет революцию в этой области [69].

1.3.4.3 Живая лаборатория

Другим примером интеграции Интернета вещей является Живая лаборатория, которая объединяет исследовательские и инновационные процессы, создавая в рамках государственно-частного партнерства людей. В настоящее время существует 320 живых лабораторий, которые используют IoT для сотрудничества и обмена знаниями между заинтересованными сторонами для совместного создания инновационных и технологических продуктов. Для того чтобы компании внедряли и развивали сервисы интернета вещей для умных городов, у них должны быть стимулы. Правительства играют ключевую роль в проектах «умных городов», поскольку изменения в политике помогут городам внедрить IoT, который обеспечивает эффективность, результативность и точность используемых ресурсов. Например, правительство предоставляет налоговые льготы и дешевую арендную плату, улучшает общественный транспорт и предлагает среду, в которой начинающие компании, творческие индустрии и транснациональные корпорации могут совместно создавать, совместно использовать общую инфраструктуру и рынки труда, а также использовать преимущества местных технологий, производственных процессов и транзакционных издержек. Взаимоотношения между разработчиками технологий и правительствами, которые управляют активами города, являются ключевыми для эффективного предоставления открытого доступа к ресурсам пользователям [70].

1.3.5 Военное применение

Интернет военных вещей (IoMT) – это применение технологий Интернета вещей в военной области для целей разведки, наблюдения и других целей, связанных с боевыми действиями [71]. Это в значительной степени зависит от будущих перспектив ведения боевых действий в городской среде и предполагает использование датчиков, боеприпасов, транспортных средств, роботов, биометрических данных, пригодных для ношения человеком, и других интеллектуальных технологий, которые актуальны на поле боя [72].

Интернет вещей на поле боя (IoBT) – это проект, инициированный и выполняемый Исследовательской лабораторией армии США (ARL), который фокусируется на фундаментальных науках, связанных с IoT, которые расширяют возможности солдат армии [73]. В 2017 году ARL запустила Альянс совместных исследований Интернета вещей на поле боя (IoBT-CRA), устанавливающий рабочее сотрудничество между промышленностью,

университетами и армейскими исследователями для продвижения теоретических основ технологий интернета вещей и их применения в армейских операциях [74] [75].

Проект «Океан вещей» – это программа, возглавляемая DARPA, предназначенная для создания Интернета вещей на больших акваториях океана в целях сбора, мониторинга и анализа данных об окружающей среде и деятельности судов. Проект предусматривает развертывание около 50 тыс. поплавков, в которых размещен набор пассивных датчиков, которые автономно обнаруживают и отслеживают военные и коммерческие суда в рамках облачной сети [76].

1.3.6 Оцифровка продукта

Существует несколько приложений «умной» или активной упаковки, в которых QR-код или NFC-метка прикрепляются к продукту или его упаковке. Сам тег является пассивным, однако он содержит уникальный идентификатор (обычно URL-адрес), который позволяет пользователю получать доступ к цифровому контенту о продукте с помощью смартфона [77]. Строго говоря, такие пассивные предметы не являются частью Интернета вещей, но их можно рассматривать как средства, способствующие цифровому взаимодействию [78]. Термин «Интернет упаковки» был придуман для описания приложений, в которых используются уникальные идентификаторы, для автоматизации цепочек поставок и масштабного сканирования потребителями для доступа к цифровому контенту [79]. Аутентификация уникальных идентификаторов, и, следовательно, самого продукта, возможна с помощью чувствительного к копированию цифрового водяного знака или шаблона обнаружения копирования для сканирования при сканировании QR-кода [80], в то время как метки NFC могут шифровать связь [81].

1.4 Тенденции IoT

Основной значимой тенденцией Интернета вещей в последние годы является взрывной рост устройств, подключенных и контролируемых интернетом [82]. Широкий спектр приложений для технологии Интернета вещей означает, что особенности могут сильно отличаться от одного устройства к другому, но есть основные характеристики, общие для большинства.

Интернет вещей создает возможности для более прямой интеграции физического мира в компьютерные системы, что приводит к повышению эффективности, экономическим выгодам и снижению нагрузки на человека [83] [84] [85] [86].

1.4.1 Интеллект

Окружающий интеллект и автономное управление не являются частью первоначальной концепции Интернета вещей. Окружающий интеллект и автономное управление также не обязательно требуют интернет-структур. Однако в исследованиях (таких компаний, как Intel) наблюдается сдвиг в направлении интеграции концепций интернета вещей и автономного управления, при этом первоначальные результаты в этом направлении рассматривают объекты как движущую силу автономного интернета вещей [87]. Перспективным подходом в этом контексте является глубокое обучение с подкреплением, в котором большинство систем интернета вещей обеспечивают динамичную и интерактивную среду [88]. Обучение агента (т.е. устройства интернета вещей) разумному поведению в такой среде не может быть решено с помощью обычных алгоритмов машинного обучения, таких как обучение под наблюдением. С помощью подхода к обучению с подкреплением обучающийся агент может определять состояние окружающей среды (например, определять температуру в доме), выполнять действия (например, включать или выключать кондиционер) и учиться за счет максимизации накопленных вознаграждений, которые он получает в долгосрочной перспективе.

Интеллект интернета вещей может быть предложен на трех уровнях: устройства интернета вещей, пограничные/ туманные узлы и облачные вычисления [89]. Необходимость интеллектуального управления и принятия решений на каждом уровне зависит от чувствительности приложения Интернета вещей ко времени. Например, камера автономного транспортного средства должна обнаруживать препятствия в режиме реального времени, чтобы избежать аварии. Такое быстрое принятие решений было бы невозможно за счет передачи данных с транспортного средства в облачные экземпляры и возврата прогнозов обратно в транспортное средство. Вместо этого все операции должны выполняться локально в автомобиле. Интеграция передовых алгоритмов машинного обучения, включая глубокое обучение, в устройства Интернета вещей – это активная область исследований, направленная на то, чтобы сделать интеллектуальные объекты ближе к реальности. Более того, можно извлечь максимальную выгоду из развертывания Интернета вещей за счет анализа данных интернета вещей, извлечения скрытой информации и прогнозирования решений по управлению. В области Интернета вещей используется широкий спектр методов машинного обучения, начиная от традиционных методов, таких как регрессия, метод опорных векторов и random forest, и заканчивая продвинутыми, такими как сверточные нейронные сети, LSTM и вариационный автокодировщик [90].

В будущем Интернет вещей может стать недетерминированной и открытой сетью, в которой автоматически организованные или интеллектуальные объекты (веб-службы, компоненты SOA) и виртуальные объекты (аватары) будут взаимодействовать и смогут действовать независимо (преследуя свои собственные цели или общие цели) в зависимости от

контекста, обстоятельств или среды. Автономное поведение посредством сбора и анализа контекстной информации, а также способности объекта обнаруживать изменения в окружающей среде (неисправности, влияющие на датчики) и вводить подходящие меры по смягчению последствий, представляет собой важную исследовательскую тенденцию, которая явно необходима для обеспечения доверия к технологии интернета вещей [91]. Современные продукты и решения интернета вещей на рынке используют множество различных технологий для поддержки такой контекстно-зависимой автоматизации, но требуются более сложные формы интеллекта, позволяющие развертывать сенсорные устройства и интеллектуальные киберфизические системы в реальных средах [92].

1.4.2 Архитектура

Архитектура системы интернета вещей в упрощенном виде состоит из трех уровней: Уровень 1: Устройства, Уровень 2: Пограничный шлюз и Уровень 3: Облако. Устройства включают сетевые устройства, такие как датчики и исполнительные механизмы, используемые в оборудовании Интернета вещей, особенно те, которые используют такие протоколы, как Modbus, Bluetooth, Zigbee или собственные протоколы, для подключения к пограничному шлюзу. Уровень пограничного шлюза состоит из систем агрегирования данных датчиков, называемых пограничными шлюзами, которые обеспечивают функциональность, такую как предварительная обработка данных, обеспечение подключения к облаку, использование таких систем, как WebSockets, концентратор событий и, даже в некоторых случаях, пограничная аналитика или туманные вычисления [93]. Уровень пограничного шлюза также необходим для предоставления общего представления об устройствах на верхних уровнях для облегчения управления. Последний уровень включает облачное приложение, созданное для Интернета вещей с использованием архитектуры микросервисов, которые обычно являются многоязычными и по своей сути безопасными с использованием HTTPS / OAuth. Он включает в себя различные системы баз данных, которые хранят данные датчиков, такие как базы данных временных рядов или хранилища активов с использованием внутренних систем хранения данных (например, Cassandra, PostgreSQL). Облачный уровень в большинстве облачных систем Интернета вещей включает систему организации очередей событий и обмена сообщениями, которая обрабатывает связь, происходящую на всех уровнях [94]. Некоторые эксперты классифицировали три уровня в системе интернета вещей как пограничный, платформенный и корпоративный, и они связаны сетью близости, сетью доступа и сетью обслуживания соответственно [95].

Основываясь на Интернете вещей, web of things - это архитектура прикладного уровня Интернета вещей, ориентированная на конвергенцию данных с устройств Интернета вещей в веб-приложения для создания инновационных вариантов использования. Для программирования и управления потоком информации в Интернете вещей прогнозируемое

архитектурное направление называется BPM Everywhere, которое представляет собой сочетание традиционного управления процессами с интеллектуальным анализом процессов и специальными возможностями для автоматизации управления большим количеством скоординированных устройств. [96]

1.5 Прогнозы и распространение IoT

В 2011 году общее количество устройств в мире, подключенных к сетям IoT, превысило количество людей, имеющих подключение интернету, и составило 4,6 млрд штук [97].

Общий мировой объём капиталовложений, по данным IDC, в направления, связанные с интернетом вещей, в 2016 году составил 737 млрд долл., в 2017 – более 800 млрд; в 2021 году – и порядка 1,4 трлн долл. [98]

Прогноз: по оценкам компании Ericsson, в 2018 году число датчиков и устройств интернета вещей должно было превысить количество мобильных телефонов, совокупный среднегодовой темп роста данного сегмента в период с 2015 по 2021 год ожидался на уровне 23 %, в 2021 году из приблизительно 28 млрд подключённых устройств по всему миру около 16 миллиардов так или иначе связаны в рамках концепции интернета вещей.

2 Обзор современных беспроводных технологий

Системы беспроводной связи стали неотъемлемой частью повседневной жизни современного человека.

Беспроводные технологии – это способ передачи информации между двумя или более точками без использования какого-либо электрического проводника или физической среды.

Благодаря беспроводным технологиями, люди могут дистанционно передавать/принимать данные, голос, изображение. Такие услуги, как телевидение, радио, сотовая связь и живые конференции стали возможны благодаря беспроводным технологиям.

2.1 Типы беспроводных сетей

Современные беспроводные сети можно условно разделить перечисленные ниже типы:

а) Беспроводные персональные сети (англ. Wireless personal area network, WPAN) – сети, стандарт которых разработан рабочей группой IEEE 802.15.

WPAN применяются для связи различных устройств, включая компьютерную, бытовую и оргтехнику, средства связи и т. д. Физический и канальный уровни регламентируются [уточнить] стандартом IEEE 802.15.4. Радиус действия WPAN составляет от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. WPAN используется как для объединения отдельных устройств между собой, так и для связи их с сетями более высокого уровня, например, глобальной сетью интернет.

WPAN может быть развёрнута с использованием различных сетевых технологий, например: Bluetooth, ZigBee и другими;

б) *Беспроводные локальные сети* (англ. Wireless local area network; wireless LAN; WLAN) – локальная сеть, построенная на основе беспроводных технологий.

При таком способе построения сетей передача данных осуществляется через радиозфир; объединение устройств в сеть происходит без использования кабельных соединений.

Наиболее распространённым на сегодняшний день способом построения WLAN сети является Wi-Fi;

в) *Беспроводные сети after Next* (англ. Wireless Network after Next, WMAN) – проект по созданию и демонстрации усовершенствованной тактической мобильной специальной сети), которая быстро адаптируется к маневрированию солдат в сложных условиях, автоматически определяя лучшие радиочастоты и сетевые маршруты для максимизации возможности подключения и пропускная способность. В 2010 году он был успешно продемонстрирован в реальных военных экспериментах, содержащих до 100 узлов;

г) *Глобальные беспроводные сети (англ. Wireless Wide Area Network)* – отличаются от локальных беспроводных сетей WLAN тем, что для передачи данных в них используются беспроводные технологии сотовой связи, такие как UMTS, GPRS, CDMA2000, GSM, CDPD, Mobitex, HSDPA, 3G, а также энергоэффективные сети дальнего радиуса действия (LPWAN), такие как 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).

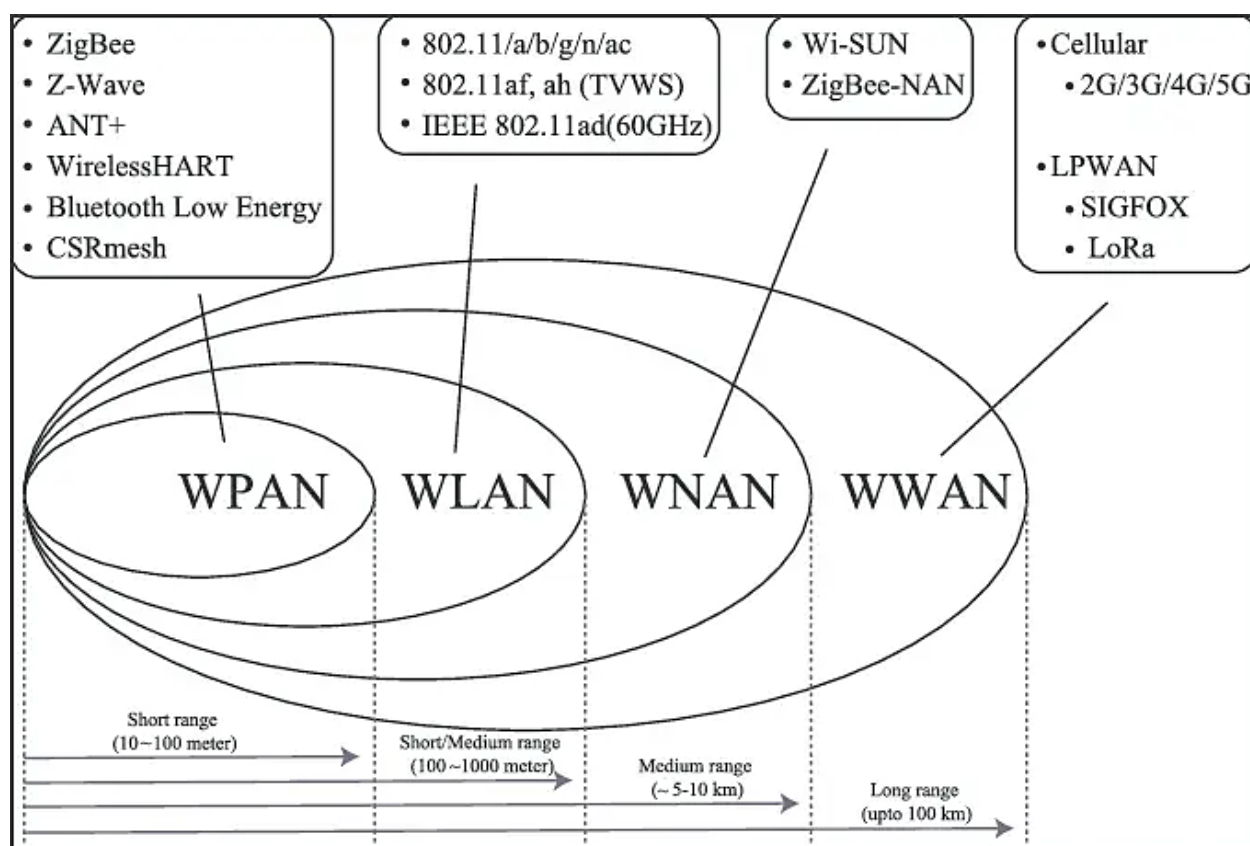


Рисунок 1 – Технологии беспроводных сетей

2.2 LPWAN технологии беспроводной связи

2.2.1 Общие сведения о LPWAN сетях

LPWAN (англ. *Low-power Wide-area Network* – «энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия») – беспроводная технология передачи небольших по объёму данных на дальние расстояния, разработанная для распределённых сетей телеметрии, межмашинного взаимодействия и интернета вещей. LPWAN является одной из беспроводных технологий, обеспечивающих среду сбора данных с различного оборудования: датчиков, счётчиков ЖКХ, устройств охранно-пожарной сигнализации.

В основе принципа передачи данных по технологии LPWAN на физическом уровне лежит свойство радиосистем – увеличение энергетики, а значит и дальности связи при уменьшении скорости передачи. Чем ниже битовая скорость передачи, тем больше энергии вкладывается в каждый бит и тем легче выделить его на фоне шумов в приёмной части системы. Таким образом, низкая скорость передачи данных позволяет добиться большей дальности их приёма.

Подход, используемый для построения LPWAN-сети, схож с принципом работы сетей мобильной связи. LPWAN-сеть использует топологию «звезда», где каждое устройство взаимодействует с базовой станцией напрямую. Сети городского или регионального масштаба строятся с использованием конфигурации «звезда из звезд».

Устройство или модем с LPWAN-модулем передает данные по радиоканалу на базовую станцию. Станция принимает сигналы от всех устройств в радиусе своего действия, оцифровывает и передаёт на удалённый сервер, используя доступный канал связи: Ethernet, сотовая связь, VSAT.

Полученные на сервере данные используются для отображения, анализа, построения отчетов и принятия решений.

Управление устройствами, обновление программного обеспечения происходит с использованием обратного канала связи.

Для передачи данных по радиоканалу, как правило, применяется нелицензируемый спектр частот, разрешенных к свободному использованию в регионе построения сети.

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

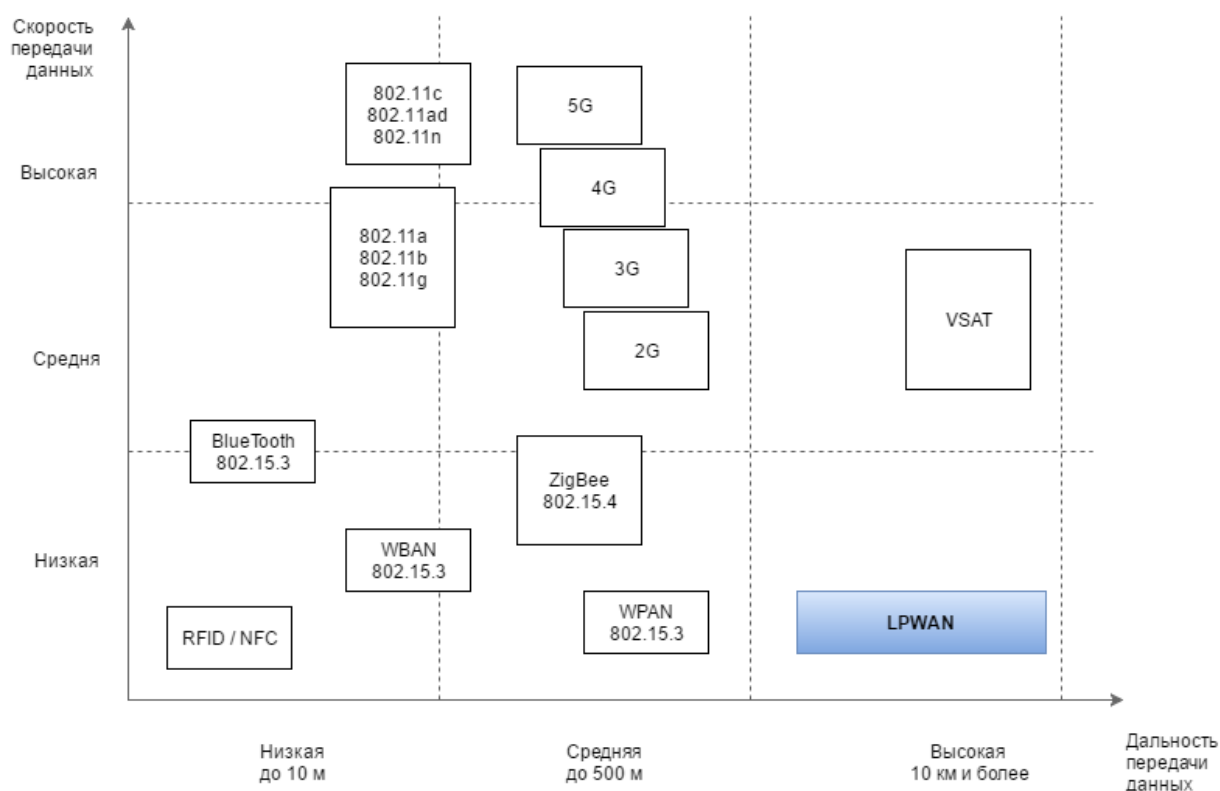


Рисунок 2 – Сравнение LPWAN с другими беспроводными технологиями

Преимущества LPWAN:

- большая дальность передачи радиосигнала по сравнению с другими беспроводными технологиями используемыми;
- низкое энергопотребление у конечных устройств, благодаря минимальным затратам энергии на передачу небольшого пакета данных;
- высокая проникающая способность радиосигнала в городской застройке при использовании частот суб-гигагерцового диапазона;
- высокая масштабируемость сети на больших территориях;
- отсутствие необходимости получения частотного разрешения и платы за радиочастотный спектр, вследствие использования нелицензируемых частот.

Недостатки LPWAN:

- относительно низкая пропускная способность, вследствие использования низкой частоты радиоканала. Варьируется в зависимости от используемой технологии передачи данных на физическом уровне, составляет от нескольких сотен бит/с до нескольких десятков кбит/с;
- задержка передачи данных от датчика до конечного приложения, связанная с временем передачи радиосигнала, может достигать от нескольких секунд до нескольких десятков секунд;
- отсутствие единого стандарта, который определяет физический слой и управление доступом к среде для беспроводных LPWAN-сетей.

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 охранным 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

Характеристика	SIGFOX	LoRa
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 Barekatain, 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 (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