

Труды МАИ. 2022. № 124  
Trudy MAI, 2022, no. 124

Обзорная статья  
УДК 621.396.13  
DOI: [10.34759/trd-2022-124-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-14)

## СТАНДАРТЫ И ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ БЛИЖНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ

**Ильгам Рамилевич Летфуллин**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

[L.ilgam@ya.ru](mailto:L.ilgam@ya.ru)

*Аннотация.* В статье рассматриваются основные технологии и стандарты беспроводной передачи данных, проводится обзор и сравнительный анализ беспроводных технологий ближнего радиуса (технология «последних 100 метров»), а также раскрыты некоторые технические характеристики. Показаны преимущества и недостатки. Для анализа технологий ближнего радиуса выбран метод сравнения параметров на основе информации отечественной и зарубежной литературы, научных статей и публикаций. Анализ способствует выбору наиболее оптимального стандарта беспроводной передачи данных для организации эффективной сети ближнего радиуса, направленной на решение основной проблемы устройств Интернета вещей – обеспечение безопасного подключения большого количества

устройств с ограниченной мощностью, развернутых на обширной территории и удовлетворяющим критериям производительности Интернета Вещей.

**Ключевые слова:** Интернет Вещей, беспроводные сети, 802.15.4, 802.15.3, ZigBee, Z-Wave, 802.11, Bluetooth Low Energy, NFC, Wi-Fi HaLow, Wireless USB, 6LoWPAN

**Для цитирования:** Летфуллин И.Р. Стандарты и технологии беспроводных сетей связи ближнего радиуса действия // Труды МАИ. 2022. № 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-14)

## STANDARDS AND TECHNOLOGIES OF SHORT-RANGE WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS

**Ilgam R. Letfullin**

Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

[L.ilgam@ya.ru](mailto:L.ilgam@ya.ru)

**Abstract.** The article discusses the main technologies and standards for wireless data transmission, provides an overview and comparative analysis of short-range wireless technologies (“last 100 meters” technology), and also discloses some technical characteristics. The advantages and disadvantages are shown. For the analysis of near-radius technologies, a method for comparing parameters was chosen based on information from domestic and foreign literature, scientific articles and publications. The analysis contributes to the selection of the most optimal wireless data transmission standard for

organizing an efficient near-range network aimed at solving the main problem of Internet of Things devices - ensuring the secure connection of a large number of devices with limited power deployed over a wide area and meeting the performance criteria of the Internet of Things.

Currently, short-range wireless communication is based mainly on Bluetooth, UWB, ZigBee and Wi-Fi standards, which are based on IEEE 802.15.1, 802.15.3, 802.15.4 and 802.11a/b/g/ah standards, respectively. The specified IEEE standards define physical (PHY) and MAC levels for wireless communication in a range of about 10-100 meters.

Based on the review, it can be concluded that 802.11ah is the most promising next-generation Wi-Fi technology for large-scale applications of the Internet of Things with low power consumption, which combines support for high data transfer rates over long distances, low power consumption, low latency, and thanks to built-in mechanisms such as RAW, TWT and TIM, significantly reduces collisions when accessing the channel, and also provides the required QoS.

It is also important to note that wireless technologies are changing rapidly following the needs of the Internet of Things market and it is recommended to monitor updates to existing standards and technologies, as well as the emergence of new short-range technologies.

The requirements for power consumption of devices, data transmission security, high network fault tolerance, the ability of devices to withstand radio interference and ease of connection remain unchanged.

**Keywords:** Internet of Things, wireless networks, 802.15.4, 802.15.3, ZigBee, Z-Wave, 802.11, Bluetooth Low Energy, NFC, Wi-Fi HaLow, Wireless USB, 6LoWPAN

**For citation:** Letfullin I.R. Standards and technologies of short-range wireless communication networks. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-14)

## **Введение**

На сегодняшний день одно из ключевых направлений развития сетей связи является концепция Интернета вещей [11]. Наблюдается огромный рост числа устройств Интернета вещей и в скором времени к сети Интернет будет подключено несколько миллиардов устройств [22], при этом подавляющее большинство из них имеет автономную систему питания. В этой связи важным параметром устройств Интернета Вещей является продолжительная автономная работа без дополнительного обслуживания. Большая часть потребления энергии в устройствах, датчиках (сенсорах) происходит во время передачи данных, в независимости от применяемой технологии беспроводной сети на передачу данных приходится порядка 85% общего энергопотребления.

Для эффективного решения задач, связанных со снижением энергопотребления, существует тип беспроводных сетей – технология ближнего радиуса (технология «последних 100 метров») [1]. Эта технология предполагает оптимизацию энергопотребления с использованием методов эффективной маршрутизации, применения оптимальных методов модуляции, сжатия данных, управления питанием и т.п.

## Способы беспроводного обмена данными

Известно два основных подхода к обеспечению обмена данными – многоскачковые сети в нелицензируемом диапазоне частот (ISM-диапазон – Industrial, Scientific and Medical Band), и второй подход – решения, построенные на базе сотовой связи дальнего действия, использующей лицензированные стандарты сотовой связи [22].

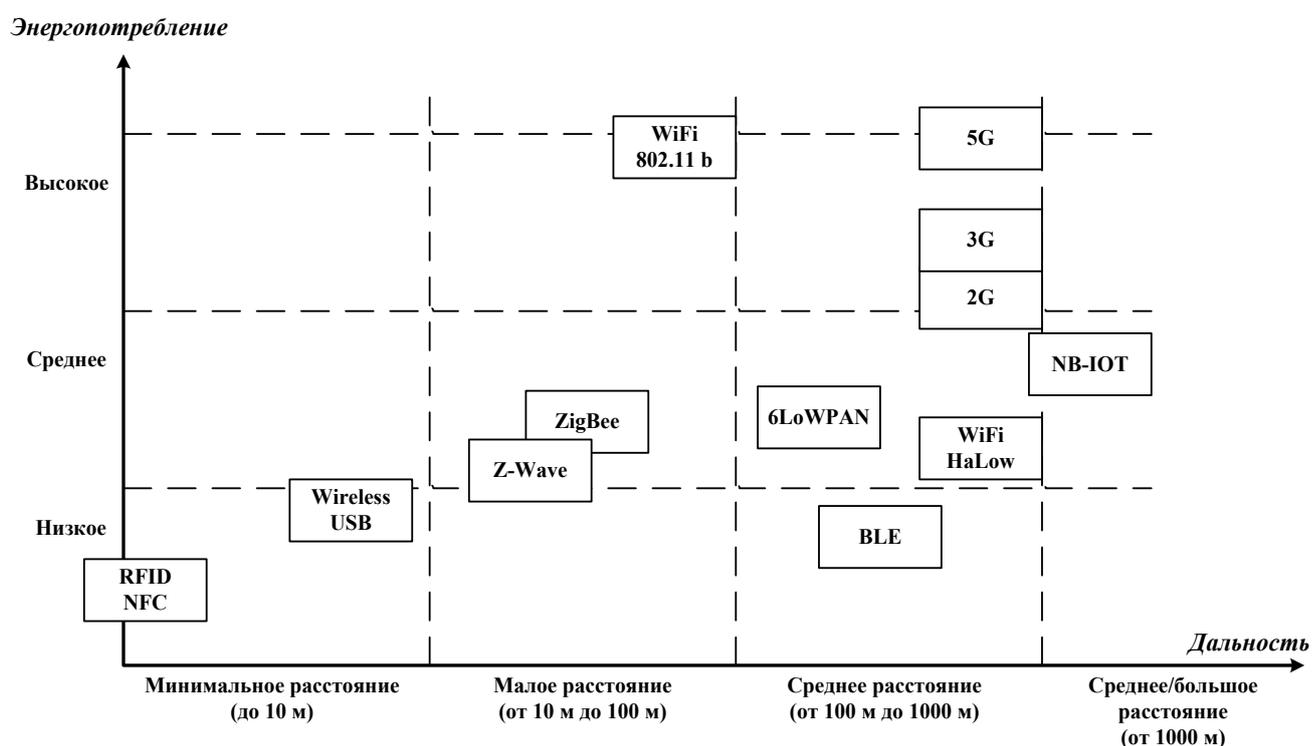


Рисунок 1 – Стандарты и технологии беспроводных сетей

Сотовые сети могут сыграть ключевую роль в распространении Интернета Вещей, поскольку способны обеспечить повсеместное покрытие, в частности проект 3GPP пытается модернизировать 2G/GSM для поддержки трафика Интернета Вещей, реализуя архитектуру сотового Интернета Вещей. Однако, стандарты сотовой связи, такие как LTE и UMTS, не предполагают и не были разработаны для предоставления услуг межмашинного взаимодействия [22], а использование технологий GSM/GPRS не подходит для потока данных, критичных ко времени

доставки. В тоже время, подключение огромного количества устройств Интернета Вещей через единую базовую станцию вызовет проблемы, связанные с администрированием, контролем и управлением трафиком, что может стать «бутылочным горлом» в распространении вышеназванной архитектуры [14].

К решениям, работающим на базе существующих стандартов мобильной связи, также можно отнести стандарт NB-IoT (Narrow Band IoT), работающий в лицензируемом спектре частот и относящийся к узкополосной системе (UNB, Ultra Narrow Band) [11]. Из-за использования сетей мобильной связи стандарт NB-IoT имеет ряд ограничений и недостатков: низкие скорости приема и передачи данных[10], необходимость постоянной синхронизации конечных устройств, большой объем служебной информации, большие задержки связи при использовании режимов энергосбережения (конечное устройство в спящем режиме недоступно со стороны сети), развертывание сетей требует выделения большого ресурса и зависит от существующего покрытия, отсутствует поддержка мобильности, а также экономическая нецелесообразность развертывания сети с «нуля»[10].

Альтернативным решением является использование многоскачковых сетей в ISM-диапазоне, принцип построения которых основан на передаче данных от устройства к устройству посредством других устройств, используемых в качестве промежуточных станций.

### **Стандарты и технологии беспроводной связи на короткие расстояния**

Спецификация беспроводных стандартов и технологий, работающих в ISM-диапазоне, обширна. Основное требование для разрабатываемых устройств

диапазона ISM — соответствие нормам, устанавливаемым регулируемыми органами для данной части спектра [6].

На практике рассматриваются технологии на основе сотовой связи или технологии с многоскачковыми переходами на короткие расстояния [14]. В последнем случае подключенные устройства работают на выделенных стеках протоколов, специально разработанных для того, чтобы справляться с ограничениями, налагаемыми на конечные устройства: минимальные массогабаритные показатели, минимальное энергопотребление и т.д. Кроме того важно, чтобы хотя бы одно такое конечное устройство выполняло функции шлюза для других устройств и было подключено к IP-сети (протоколы транспортного уровня IPv4/IPv6).

В настоящее время одними из наиболее востребованных стандартов Интернета вещей являются технологии беспроводной связи на малых расстояниях. К данной категории относятся стандарты, радиус действия которых не превышает 100 метров: BLE (Bluetooth Low Energy), IEEE 802.15.4, ZigBee, NFC, IrDA, Wi-Fi 802.11, UWB и другие.

Современные беспроводные сети характеризуются набором параметров, среди которого можно выделить следующий базовый набор:

- частотный диапазон и полоса используемых частот;
- скорость передачи;
- структура передаваемого пакета;
- методы авторизации, регистрации устройств (сенсоров, шлюзов, серверов) и защиты данных;

- дальность действия;
- энергоэффективность (потребляемая мощность);
- методы модуляции сигнала;
- методы управления частотной полосой, разделения и уплотнения каналов.

В таблице 2 приведены актуальные и наиболее востребованные на данный момент технологии беспроводной связи.

Подавляющее большинство технологий базируется на использовании стандарта IEEE 802.15.4, в частности ZigBee, Wireless HART, Thread, 6LoWPAN.

Вопрос в том, какую технологию выбрать и каким образом организовать элементы и устройства Интернета вещей является одним из главных при построении сети. Основными критериями при выборе стандарта являются: дальность, высокая скорость передачи данных, минимальная задержка, возможность организации надежной и безопасной, самовосстанавливающейся сети.

### **Технология ZigBee**

ZigBee – открытая технология беспроводной связи для систем сбора данных, управления и автоматизации, основанная на стандарте IEEE 802.15.4, позволяет создавать низкоскоростные самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся ячеистые сети с автоматической ретрансляцией сообщений и гарантированной доставкой.

Технология ZigBee предусматривает возможность использования каналов в нескольких частотных диапазонах: 868 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц. Максимальная скорость передачи данных достижима в диапазоне (2,4-2,48) ГГц. В данном диапазоне предусмотрено 16 каналов по 5 МГц [1, 20].

Таблица 2 – Стандарты и технологии беспроводной связи

Технология	ZigBee	BLE v5.0	6LoWPAN	NFC	Wi-Fi 802.11g	Wireless USB	Z-Wave	Wi-Fi HaLow 802.11 ah
Частотный диапазон, МГц	0,868/ 0,915/ 2400÷2483,5	2402÷2485	2400	13,56	2412÷2483,5	2850÷10600	0,869/ 0,920/ 0,915/	868/900
Скорость передачи данных, Мбит/сек	0,020/ 0,040/ 0,250	≤2	0,20	0,106/ 0,424	54	53,3÷480	0,096/ 0,40/ 0,1	0,15÷347,0
Дальность связи, М	100	10-800	150	0,1	100	10 (107Мбит/с) 3 (480 Мбит/с)	30	1000
Потребление тока, мА/мкА (режим standby)	30/1	18/0,1	35/5	15/0,01	250	21/3	25/2,5	23/0,5
Метод расширения спектра	DSSS FHSS (для ZigBee Pro)	FHSS (ширина канала – 2МГц)	DSSS	-	FHSS	DS-UWB MB-OFDM	-	OFDM
Топология сети	«звезда», «дерево», MESH	«точка-точка», «звезда», MESH	«точка-точка», «звезда», MESH	«точка-точка»	«звезда»	«звезда»	«точка-точка», дерево, MESH	«точка-точка», «звезда», MESH
Размер сети	65536 (16-битные адреса) 2 <sup>64</sup> (64-битные адреса)	32767	100	2	255 (теор.)	До 127 на хост	До 232	До 8192

Технология	ZigBee	BLE v5.0	6LoWPAN	NFC	Wi-Fi 802.11g	Wireless USB	Z-Wave	Wi-Fi HaLow 802.11 ah
Тип модуляции сигнала	BPSK/ BPSK/ O-QPSK	GFSK	16-уровневая O-QPSK	ASK BPSK	FSK/PSK	QPSK 8PSK	FSK, GFSK	BPSK/ QPSK/ 16-QAM/ 64-QAM- 256-QAM
Размер данных пакета, байт	127	255	127	153	1500	-	127	≈100
Шифрование	AES-128	AES-128	AES-128	-	WEP	AES128 + CBC-MAC	S2 Security (3DES)	WPA3
Поддержка движущихся между хабами сенсоров	Да	Да	Да	Нет	Да	Да	Да	Да
Адресация	16 и 64-бит MAC, 16-бит ID сети	48-бит открытый адрес Bluetooth или случайный адрес	128-бит IP, 16-бит уникальный и 64-бит IEEE	-	48-бит MAC	-	4-байта ID сети, 1-байт-ID устройства	18-байт
Задержка при установлении соединения, мс	<5	<3	-	100	25	<2	200	<3

Скорость передачи данных вместе со служебной информацией составляет 250 кбит/с. Средняя пропускная способность для полезных данных в зависимости от загруженности сети и количества ретрансляций составляет порядка от 5кбит/с до 40 кбит/с. Расстояния между узлами сети при работе внутри помещений составляет несколько десятков метров, на открытом пространстве порядка сотен метров [20,24]. Безопасность информационного обмена обеспечивается алгоритмом шифрования AES-128.

В сети ZigBee могут участвовать два разных типа устройств: полнофункциональные устройства и устройства с ограниченными функциями. Полнофункциональные устройства (далее – ПФУ) могут работать в трех режимах: координатор, маршрутизатор и конечное устройство [8, 12]. ПФУ может обмениваться данными с устройствами с ограниченным функционалом или другими ПФУ, в то время как устройство с ограниченным функционалом может работать в паре только с одним ПФУ [8].

Стандарт IEEE 802.15.4 и спецификация ZigBee Specification регламентируют протоколы передачи данных, определяют сетевую инфраструктуру и обеспечивают функционирование беспроводной сети, позволяют реализовать не только топологии «точка-точка», «звезда», но и «дерево» и ячеистую сеть, с возможностью ретрансляций и поиска эффективного маршрута передачи [12, 20]

В соответствии со стандартом IEEE 802.15.4 описывается физический уровень и уровень доступа к среде, а ZigBee Specification описывает сетевой уровень и уровень приложений, предоставляющий возможность разрабатывать простые

профили на основе атрибутов [1, 24]. Доступ к каналу реализуется по принципу множественного доступа с прослушиванием несущей.

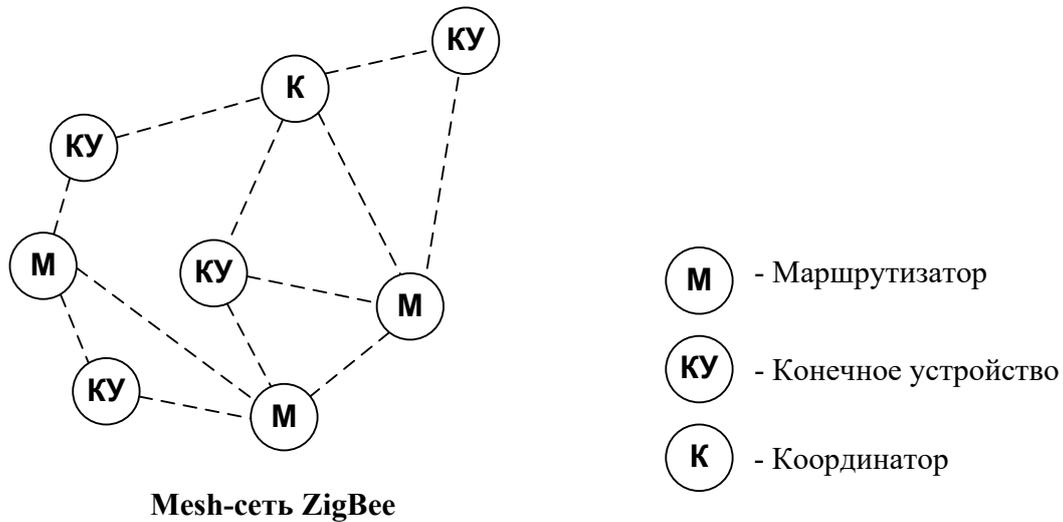


Рисунок 2 – Ячеистая топология сети ZigBee

В качестве основных положительных свойств выделим ячеистую топологию и специальные алгоритмы маршрутизации, позволяющие обеспечить самовосстановление и гарантированную доставку пакетов в случаях обрыва связи

**Упрощенная модель OSI**

Прикладной уровень
Транспортный уровень
Сетевой уровень
Канальный уровень
Физический уровень

**Стек ZigBee**

Приложения ZigBee
Профайлы ZigBee
APS (подуровень поддержки приложений)
NWK (сетевой уровень)
DLC (уровень канала передачи данных)
IEEE 802.15.4 MAC
IEEE 802.15.4 PHY

Рисунок 3 – Соотношение стека протоколов модели OSI и ZigBee

между отдельными узлами, простота развертывания сети и способность сети ZigBee отслеживать устройства и топологию сети в режиме частых подключений, отключений и переподключений устройств. В дополнение спецификация ZigBee предусматривает криптографическую защиту данных и низкое энергопотребление. Существенным недостатком являются работа в зашумленном диапазоне частот, малый радиус действия, низкая реальная пропускная способность, отсутствие стандартизации и единой программно-аппаратной платформы для разработки и, как следствие, возникающие проблемы с совместимостью устройств, работающих в сетях ZigBee.

### **Технология Bluetooth Low Energy**

Стандарт Bluetooth предназначен для обмена данными на короткие расстояния, как альтернатива кабельной сети и проводам для компьютерной периферии—клавиатуры, джойстики, принтеры и т.д. Данный стандарт поддерживает достаточно разветвленную сеть устройств.

Технология Bluetooth Low Energy (далее – BLE) представляет собой компромисс между энергосбережением, задержкой при передаче данных и пропускной способностью. Согласно теоретическим результатам расчета и апробации данного стандарта, срок службы устройства BLE на автономном элементе питания составляет от 2 дней до 14 лет. Минимальная задержка для ведущего устройства для получения данных с датчика оставляет 676 мкс, но при высокой частоте битовых ошибок средняя задержка увеличивается втрое [15].

Отличие BLE v5.0 от BLE v4.0 в добавлении новых вариантов спецификаций физического уровня (PHY). Каждый вариант имеет свои особенности и был

разработан с учетом конкретных приложений. Сравнительный анализ приводится в таблице 3 [23].

Таблица 3 – Спецификации BluetoothLowEnergy

Параметр/Спецификация	LE1M	LE-кодированный	LE2M
Символьная скорость	1 Мбит/с	1 Мбит/с	2 Мбит/с
Скорость передачи данных	1 Мбит/с	125 кбит/с	2 Мбит/с
Реальная максимальная скорость передачи данных	800 кбит/с	100 кбит/с	1,4 Мбит/с
Схемаобнаружения ошибок	CRC	CRC	CRC
Схемаисправление ошибок	Нет	FEC	Нет
Множитель дальности/ дальность, м	1/250	4/1000	0,8/200

Техника коррекции, исправляющая ошибки методом упреждения – Forward Error Correction (FEC), снижает количество битовых ошибок и позволяет увеличить дальность связи до 1 км без повторной отправки [23], но при этом повышается энергопотребление в связи с увеличением времени активности передатчика при передаче и снижается скорость передачи, т.к. добавляется избыточность для коррекции ошибок.

Архитектурные решения радиочастотных модулей спроектированы исходя из дешевизны, низкого энергопотребления и минимальных габаритов микросхем. Модули состоят из приемопередающей части, контроллера и управляющего устройства – хоста, реализующего протоколы верхнего уровня [15, 23]. Связь между хостом и контроллером стандартизована как интерфейс хост-контроллер (HCI) [15]. Стек протоколов BLE показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Соотношение стека протоколов модели OSI и BLE.

Устройства BLE работают в ISM-диапазоне частот 2,4 ГГц, со скачкообразной перестройкой частоты по 40 каналам с разносом в 2МГц [15], из которых 3 канала используются для обнаружения и 37 для приема/передачи данных.

Технология BLE определяет две роли для устройств на канальном уровне для созданного подключения: ведущее и ведомое. Ведущий, он же инициатор, может управлять одновременно несколькими подключениями с разными ведомыми устройствами, ведомое устройство может быть подключено только к одному ведущему. Сеть, состоящая из ведущего устройства и его подключенных устройств, называется пико-сетью (piconet) с топологией «звезда» [12, 20, 23], а комбинация нескольких пико-сетей носит название рассредоточенная сеть (scatternet), реализуя тем самым mesh-сеть [27].

К преимуществам стандарта BLE можно отнести: охват всех уровней модели OSI, высокий уровень стандартизации и совместимости между устройствами от разных производителей, защита передаваемых данных, низкое энергопотребление,

возможность адаптации под задачи приложений, возможность масштабирования сети, минимальное время отклика, уменьшение уровня взаимных помех за счет реализации доступа устройств к среде передачи по схеме разделения по времени (TDMA).

Недостатки: невысокая реальная скорость передачи данных, невысокая проникающая способность в городской среде, в виду быстрого затухания сигнала на частоте 2,4ГГц, отсутствует возможность определения местоположения устройств, неоптимальное использование пропускной способности в Bluetooth mesh - сетях в виду использования лавинной маршрутизации, короткий частотный диапазон.

### Технология IEEE 802.15.4 6LoWPAN

6LoWPAN – представляет собой открытый стандарт с поддержкой mesh-сетей и предполагает ретрансляцию пакетов через несколько узлов, адаптирован для физического (PHY) и MAC-уровня сетей IEEE 802.15.4 [19] и позволяет передавать пакеты данных в сетях IPv6.

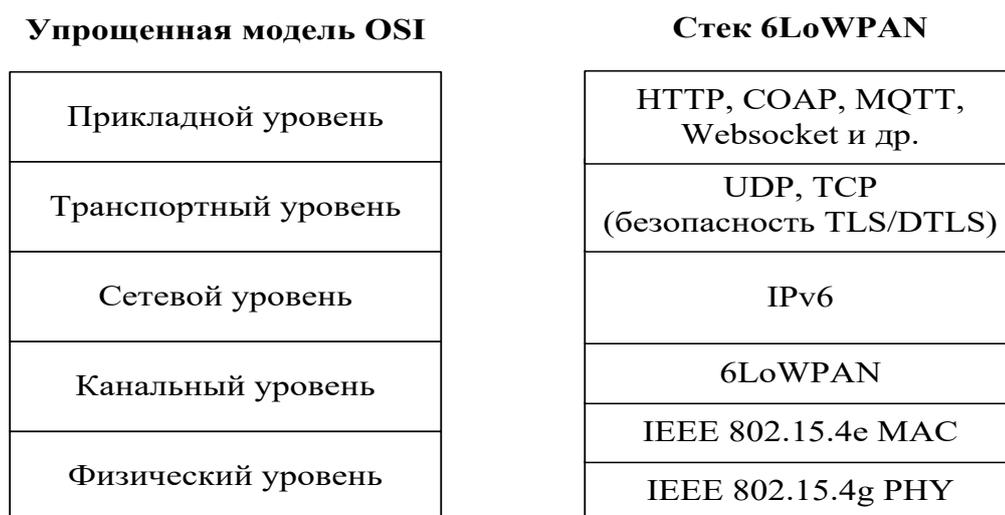


Рисунок 5 – Соотношение стека протоколов модели OSI и 6LoWPAN

6LoWPAN поддерживает диапазоны 868 МГц, 915 МГц и 2450 МГц, пропускная способность ограничена 200 кбит/с, длина пакета 127 байт позволяет достичь низкой частоты ошибок пакетов и бит при передаче [16, 19] и построить практически неограниченную по размерам сеть. Количество переходов между устройствами ограничено 255 хопами, что эквивалентно TTL (время жизни IP-пакетов), ограничение введено с целью недопущения снижения пропускной способности сети и бесконечного блуждания пакетов [19].

Поправка IEEE 802.15.4e к MAC-уровню предлагает переключение каналов с выделением квантов времени и координированное избирательное прослушивание, что положительно влияет на устойчивость работы стандарта и обеспечивает дополнительное снижение энергопотребления [17]. Поправка IEEE 802.15.4g к физическому уровню позволяет увеличить диапазон частот [17].

Для реализации бесшовного соединения MAC-уровня и сетевого уровня IPv6 добавлен адаптивный уровень между ними для сжатия заголовков, фрагментации и пересылки второго уровня [19].

Архитектура 6LoWPAN –сети построена на взаимодействии с IP-сетью через стандартные IP-маршрутизаторы. Одна 6LoWPAN-сеть связана с другими IP-сетями через один или более граничных маршрутизаторов (Рисунок 6).

IP-маршрутизаторы на границах сетей (граничные маршрутизаторы) не зависят от прикладных протоколов, используемых в 6LoWPAN-сетях, что позволяет снизить нагрузку на маршрутизатор, в частности вычислительную мощность, позволяя сократить себестоимость и использовать встраиваемые устройства с простым программным обеспечением [16].

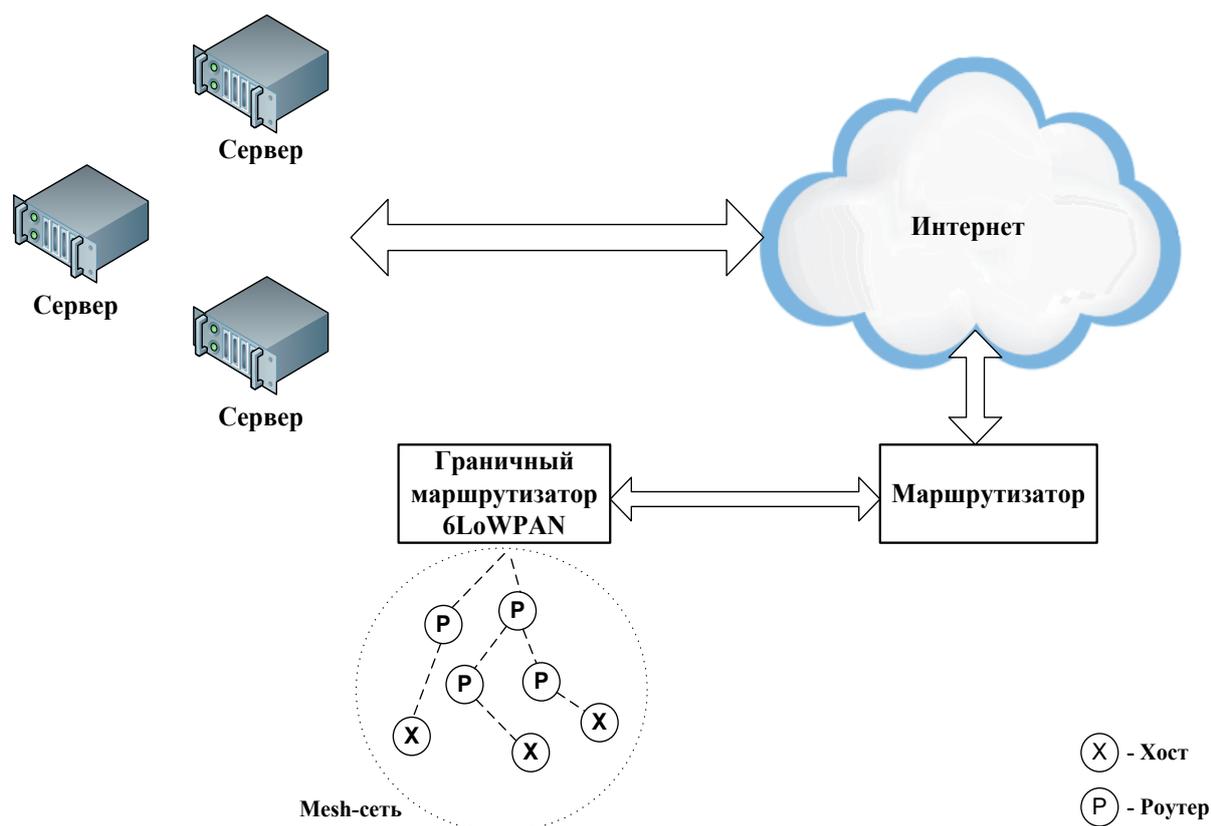


Рисунок 6 – Архитектура сети 6LoWPAN

Достоинства стандарта 6LoWPAN: возможность реализации маломощных беспроводных сетей в диапазонах ниже 1 ГГц так и в диапазоне 2,4 ГГц, поддержка ячеистой топологии, поддержка IP-сетей, автоконфигурирование (автономная генерация IP-адресов устройствами) и обнаружение соседнего узла путем рассылки уникального адреса, высокая надежность и отказоустойчивость сети и низкое энергопотребление. Спецификация 6LoWPAN-сетей предусматривает криптографическую защиту данных симметричным алгоритмом блочного шифрования AES-128 (безопасность канального и транспортного уровня, при доступном аппаратном кодировании) [19] и предполагает использование следующих типов адресов: 128-битный IPv6-адрес, 16-битный короткий адрес и расширенный адрес EUI-64. Два из представленных типов адресов, 16-битный и расширенный

EUI-64 адрес, уменьшают общий объем служебной информации в заголовке пакета и минимизируют требования к памяти [19]. В дополнении к сказанному, сюда же можно отнести относительную простоту разработки и запуска сети по сравнению, например, с ZigBee.

Из недостатков можно выделить следующее: учитывая, что максимальный пакет данных – 128 байт, результирующий размер полезной информации – 102 байта. Безопасность канального уровня накладывает дополнительные расходы на размер пакета, которые в случае AES-CCM-128 составляют 21 байт, 9 и 13 байт в случае AES-CCM-32 и AES-CCM-64, соответственно. Таким образом, для полезной информации остается 81 байт [19]. Также, устройства 6LoWPAN-сетей имеют более высокую вероятность недоступности, по причине нахождения в спящем режиме или в режиме отключения питания для экономии энергии автономного элемента питания.

### **Технология NFC**

Технология NFC (Near Field Communication – «коммуникация ближнего поля») построена на свойствах электромагнитной индукции и, по сути, является продвинутой версией стандарта RFID (радиочастотная идентификация).

NFC работает на частоте 13,56 МГц со скоростью передачи данных от 106 кбит/сек до 424 кбит/сек в зашифрованном виде, на расстояниях до 10 см [1,7].

Технология позволяет работать в трех режимах [3, 18]:

1) **Активный.** В этом режиме возможно считывание и запись данных с метки/карточки. Еще этот режим можно назвать режимом эмуляции.

2) **Пассивный.** Режим считывания данных с метки/карточки.

3) Передача данных между равноправными устройствами. Режим P2P.

Данную технологию можно интегрировать с Bluetooth и Wi-Fi, что упростит процесс сопряжения со стороны обеих устройств.

Основные преимущества, которые предоставляет технология:

- достаточно быстрое подключение и инициация обмена данными;
- низкое энергопотребление, порядка 15 мА (в режиме чтения);
- отсутствие у меток/карточек собственного автономного питания;
- малый радиус действия позволяет обеспечить безопасность;
- совмещение с существующими RFID-системами.

### **Стандарты Wi-Fi 802.11g и Wi-Fi HaLow 802.11ah**

Аббревиатура Wi-Fi является сокращенным названием зарегистрированной торговой марки «Wi-Fi Alliance». Технология была разработана в 1991 г. фирмой NCR Corporation и предназначалась для использования в торгово-кассовых аппаратах.

Технология Wi-Fi основана на семействе беспроводных стандартов IEEE 802.11x, предусматривает два типа архитектуры сетей Ad-Hoc и инфраструктура, стандарт используется для организации высокоскоростных беспроводных локальных сетей, работающих в ISM-диапазонах частот 2,4 ГГц и 5 ГГц [3, 9].

Стек Wi-Fi 802.11g определяет только два уровня модели OSI – физический и канальный (Рисунок 7). Подуровень управления логическим каналом выполняет общие для всех локальных вычислительных систем функции, физический уровень определяет саму технологию семейства 802.11, то есть используемый частотный диапазон, метод кодирования, скорость передачи.

Модель OSI	Стек Wi-Fi 802.11
Прикладной уровень	Прикладной уровень
Уровень представления	Уровень представления
Сеансовый уровень	Сеансовый уровень
Транспортный уровень	UDP, TCP
Сетевой уровень	IPv4, IPv6
Канальный уровень	Подуровень управления логическим каналом (LLC)
	Подуровень управления доступом к среде (MAC)
Физический уровень	Физический уровень

Рисунок 7 – Соотношение стека протоколов модели OSI и Wi-Fi 802.11

Уровни транспортный и сетевой используют стандартные протоколы, например, UDP или TCP для транспортного уровня и IPv4 или IPv6 для сетевого уровня. Прикладной уровень, отвечающий за совместимость устройств, определяется разработчиками и производителями аппаратных и программных решений.

Стандарт 802.11g предполагает не более 255 узлов, хотя реальная картина на практике показывает, что подключение уже 5 устройств вызывает снижение скорости передачи [20], также, каждый из узлов требует до 1Мб системных ресурсов и наличие высокопроизводительного микропроцессора для обработки. Радиус действия 802.11g внутри помещений составляет около 50 метров или 100 метров в условиях прямой видимости. Приёмник 802.11g всегда находится во включенном состоянии, что сказывается на энергопотреблении, к тому же устройства 802.11g на автономном питании практически отсутствуют [9,12].

Wi-Fi 802.11 – это мощная и одна из самых популярных и общепризнанных групп стандартов с повсеместно доступной инфраструктурой, применяется для высокоскоростной передачи данных (до 54 Мбит/с для 802.11g с полосой пропускания 22 МГц), с достаточно высоким энергопотреблением, в сравнении с другими беспроводными протоколами.

Рассматривая стандарт Wi-Fi 802.11 в целом и 802.11g в частности, самым весомым недостатком является большое энергопотребление, что нежелательно в приложениях Интернета Вещей. Также данный стандарт не имеет возможности реализации ячеистой топологии, т.к. сети Wi-Fi 802.11 строятся по топологии «звезда», что отрицательно сказывается как на надежности инфраструктуры сети, так и на производительности в целом, что явно не соответствует требованиям, предъявляемым к современным беспроводным сетям. В стандарте 802.11g используется алгоритм шифрования WEP, имеющий уязвимости в механизме обмена ключами и проверки целостности, а также в способе аутентификации и в самом алгоритме шифрования.

### **Стандарт Wi-Fi HaLow 802.11ah**

В 2010 году специально созданная рабочая группа IEEE 802.11 запустила проект IEEE 802.11ah, который вывел стандарт 802.11 в нелицензируемый суб-гигагерцовый диапазон для эффективных и крупномасштабных беспроводных сетей и межмашинного взаимодействия (M2M) [24, 37]. Таким образом, 802.11ah HaLow – это первый стандарт Wi-Fi, специально разработанный для приложений Интернета вещей.

Стандарт работает в ISM-диапазоне частот – 750 МГц ÷ 950 МГц, что позволяет увеличить радиус покрытия до 1 км за счет меньшей интенсивности затухания и повысить проникающую способность сигнала, одновременно выполнив требования по снижению потребляемой мощности [26], но расплатой за это является малая мощность сигнала в дальней зоне приема.

Также стандарт вводит несколько новых специфических механизмов, таких как окно ограниченного доступа (RAW), сегментация карты индикации трафика (TIM) и целевое время пробуждения (TWT). Все эти механизмы направлены на повышение эффективности и снижение задержек в условиях плотно развернутых беспроводных сетей и, соответственно, делают стандарт 802.11ah привлекательным для приложений Интернета вещей [21].

Для обеспечения более высокой пропускной способности используется технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) с усовершенствованными схемами модуляции и кодирования в диапазонах ниже 1 ГГц, основанная на 10-кратном снижении тактовой частоты стандарта 802.11ac. Реализуемый при этом протокол «слушай перед разговором» позволяет достичь меньше конфликтов в среде передачи и меньше энергии, расходуемой на повторную передачу пакетов [21,26]. Высокой пропускной способности 802.11ah стала возможной благодаря поддержке метода связывания каналов, используемого в спецификациях стандарта 802.11n и 802.11ac: несколько соседних более узких каналов связываются вместе для получения широкого канала [21, 26].

В структуре MAC-уровня 802.11ah претерпели изменения некоторые функции,

включая поддержку большого количества станций, энергосбережение, механизмы доступа к среде и повышение пропускной способности [21, 22, 26].

Поддержка Mesh-сетей стандартом 802.11ah позволяет последовательно соединять и объединять тысячи устройств в сеть [26].

В HaLow определена встроенная поддержка IP-трафика. Используя маршрутизатор с поддержкой Wi-Fi HaLow, все клиентские устройства применяют транспортные протоколы IPv4/IPv6 для прямого доступа в Интернет, для облачных сервисов и управления данными Интернета вещей. Важно отметить, что другие технологии беспроводного Интернета вещей, такие как Bluetooth, Zigbee, требуют проприетарного шлюза для преобразования всего локального клиентского трафика в IP-трафик для доступа в Интернет. Эти дополнительные этапы обработки пакетов, необходимые для обертывания дополнительных данных вокруг пакетов, добавляют задержки и снижают эффективность сетей.

Стандарт 802.11ah экономит энергию устройств, находящихся в спящем режиме в течение длительных периодов времени. Это обеспечивает вариативность электропитания, начиная от небольших батарей для приложений с малой досягаемостью до более крупных батарей и устройств с большей мощностью, достигающих дальности более 1 км [21,26].

802.11ah сочетает в себе преимущества Wi-Fi и стандартов связи с низким энергопотреблением, поддерживает высокую скорость передачи данных и соответствует высоким критериям производительности различных приложений Интернета вещей с учетом индивидуальных подходов, таких как крупномасштабные сети, низкое энергопотребление и QoS [21].

Недостатками 802.11ah является несовместимость с устаревшими технологиями IEEE 802.11 и большие габариты антенн в суб-гигагерцовом диапазоне по сравнению с 2,4 ГГц.

### **Технология Wireless USB**

Технология UWB (технология сверхширокополосной связи, СШП), лежащая в основе стандарта Wireless USB, интересна как высокоскоростная технология беспроводной связи на короткие расстояния с пропускной способностью, составляющей до 480 Мбит/с [20,28]. Данная технология является бесспорной альтернативой высокоскоростной кабельной сети передачи данных.

Технология UWB удовлетворяет требования большинства мультимедийных приложений и позволяет за счет широкого частотного диапазона (от 2,8 ГГц до 10,6 ГГц) передать по беспроводному каналу, с низкой спектральной плотностью мощности, на небольшие расстояния значительно большие объемы данных за меньшее время, по сравнению с традиционными беспроводными технологиями [3, 13, 28].

В отличие от методов расширения спектра, используемых, например, в BLE, WiFi, ZigBee, спектр для СШП-сигналов генерируется напрямую, без индивидуальной модуляции битов информации [2,13].

Методы СШП-передачи позволяют осуществить разделение нескольких лучей с различным запаздыванием и устранить эффект замирания сигналов, вызванный многолучевым распространением [2, 13].

Беспроводные интерфейсы, поддерживающие технологию UWB, созданы на базе спецификаций IEEE 802.15.3.

Стандарт Wireless USB сочетает в себе достоинства технологии СШП и является одним из серии стандартов беспроводных интерфейсов, поддерживающих эту технологию, и является своего рода эволюций проводного стандарта USB. Wireless USB сохранил в себе программную инфраструктуру, т.е поддержку драйверов стандартного класса устройств (HID, запоминающее устройство и т.д) [28].

Стандарт основан на уплотнении сигнала с ортогональным частотным разделением (OFDM). Данный метод уплотнения заключается в том, что OFDM-модуляция производится в полосе около 500 МГц с последующим переносом на центральную частоту поддиапазона, в котором в данный промежуток времени ведется передача. Подобная архитектура накладывает менее жесткие требования к точности синхронизации приемного и передающего устройств и позволяет повысить гибкость спектральной адаптивности системы за счет включения/отключения поднесущих [4, 12].

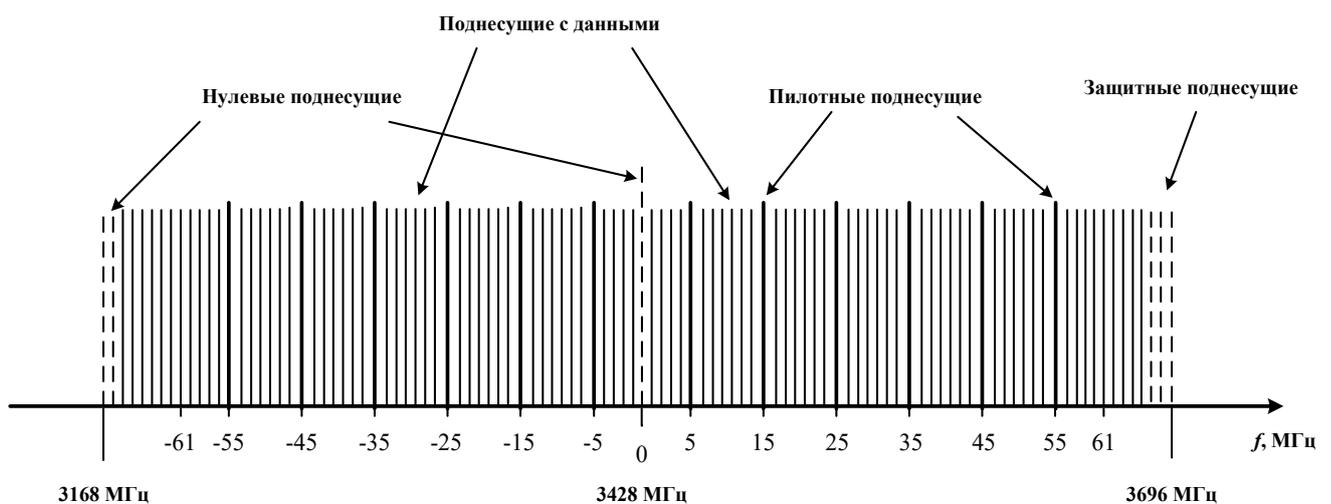


Рисунок 8 – Структура MB-OFDM сигнала

Канал стандарта Wireless USB представляет собой последовательность связанных управляющих пакетов данных, излучаемых хостом в регламентированных стандартом временных рамках. Временные рамки формируются командами управления с планирование (MMC) [28].

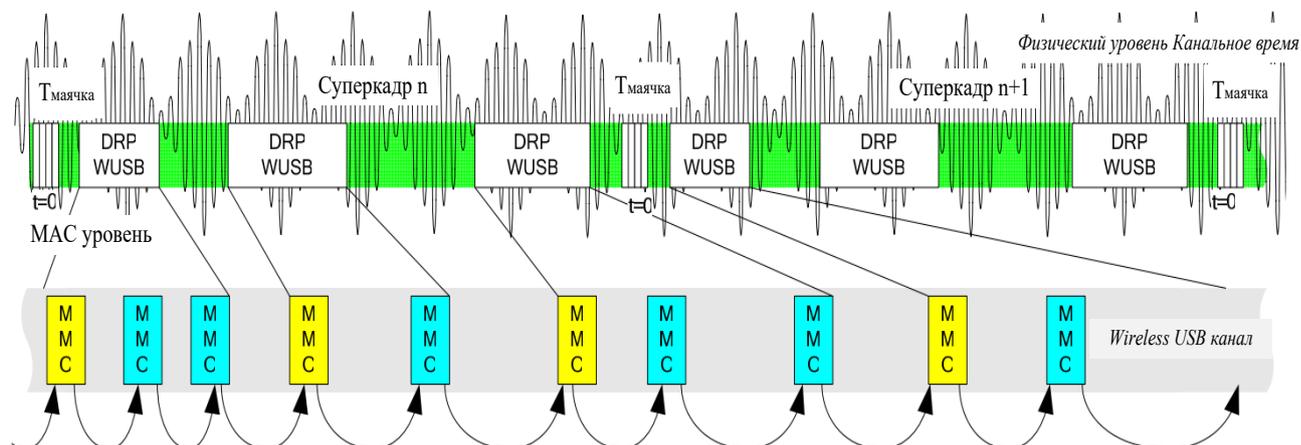


Рисунок 9 – Канал Wireless USB [28]

Топология Wireless USB представляет собой «звезду», роль центрального элемента выполняет хост-контроллер, который инициализирует трафик с каждым подключенным к нему периферийным устройством и управляет потоком данных, выделяя каждому соответствующий тайм-слот и соответствующую ширину полосы пропускания канала [28].

Каждое Wireless USB устройство подключается к хосту по схеме «точка-точка». Основным отличием такой схемы от проводной версии USB – отсутствие в топологической схеме специальных дополнительных концентраторов. Беспроводной USB-хост подразумевает логическое подключение до 127 Wireless USB устройств [20, 28]. UWB-канал, поддерживающий прямое соединение между устройствами, может служить для обмена данными в сетях с архитектурой «ad-hoc» [2,4].

Преимуществами стандарта являются: простота технической реализации передающего и приемного устройства на системе-на-кристалле, высокая эффективность радиочастотного спектра за счет применения технологии MB-OFDM, использование частот с пилот-сигналами для синхронизации и динамической оценки канала, низкая спектральная плотность, обеспечивающая скрытность системы и несанкционированный перехват информации, а также возможность совместного использования радиочастотного спектра и высокая помехоустойчивость [2, 4, 12]. К недостаткам следует отнести: зависимость скорости передачи данных от расстояния между устройствами, высокие требования к вычислительным ресурсам, более высокую стоимость оборудования, длительное время захвата сигнала, а также низкую скорость внедрения стандарта и поддержку малого количества устройств.

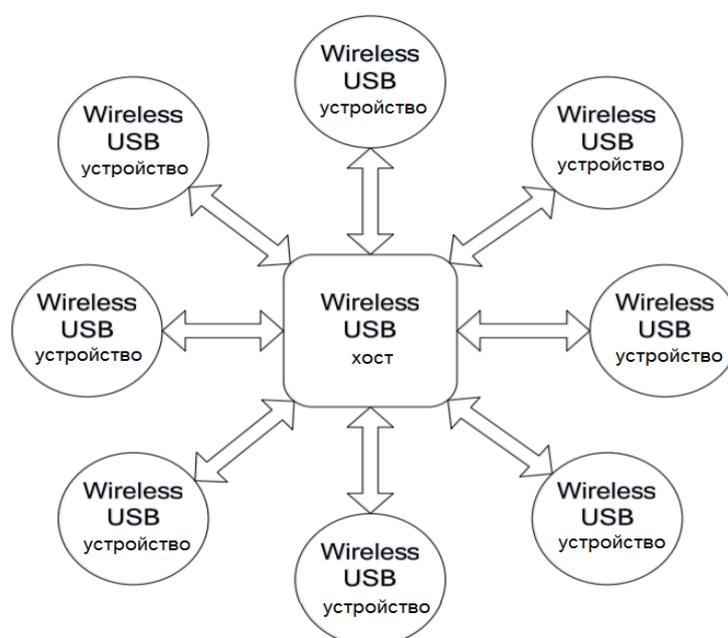


Рисунок 10– Топология сети Wireless USB

## Технология Z-Wave

Z-Wave — запатентованная, стандартизованная и открытая беспроводная технология связи, основанная на международном стандарте PHY MAC ITU-T G.9959, описывающем спецификации уровней PHY, MAC, SAR LLC для узкополосных систем радиосвязи ближнего действия. Эта технология является одной из самых популярных и разработана для использования под задачи домашней автоматизации [5, 7].

На сегодняшний момент существует несколько спецификаций протокола Z-Wave: Z-Wave, Z-Wave Plus и Z-Wave Long Range. Сравнительные характеристики спецификаций представлены в таблице 4 [24, 25].

В протоколе Z-Wave проработаны все уровни (кроме представительского в виду его отсутствия) сетевой модели OSI – от прикладного до физического, что гарантирует высокий уровень аппаратно-программной совместимости устройств от разных поставщиков.

Таблица 4 – Спецификации протокола Z-Wave

Стандарт	Дальность связи, м	Размер сети (кол-во поддерживаемых устройств)	Безопасность (протокол шифрования)	Возможность обновления прошивки Over-The-Air (OTA)
Z-Wave	≤100	232	S2 Security (3DES)	Нет
Z-Wave Plus	≤150	232	S2 Security (3DES)	Да
Z-Wave LongRange (LR)	≤400	2000	S2 Security (3DES)	Да

Z-Wave поддерживает асинхронный полудуплексный протокол с подтверждением передачи пакетов и повторной отправкой, что является

оптимальным решением для приложений, работающих в реальном времени и не зависящих критически от времени исполнения [5].

Данная технология работает в суб-гигагерцовом диапазоне до 1ГГц, поддерживает скорость передачи данных до 100 кбит/сек, шифрование Security 2 (S2), транспортный протокол IPv6 и многоканальную работу [12, 24]. Поддержка IPv6 стала возможна благодаря программной настройке для передачи пакетов Z-Wave поверх протокола TCP/IP (описание Z-Wave over IP) [24].

Каждая логическая сеть Z-Wave в состоянии поддерживать работу до 232 устройств, в спецификации Z-Wave LR – до 2000 устройств. При необходимости подключения большего количества устройств существует возможность объединения сетей. Благодаря минимизации размера передаваемого пакета и ограничению, обязывающему устройства находиться в активном режиме не более 1 % времени, с целью обеспечения минимальной нагрузки на радиоканал [12, 24], стало возможным сосуществование на одной территории нескольких сетей Z-Wave.

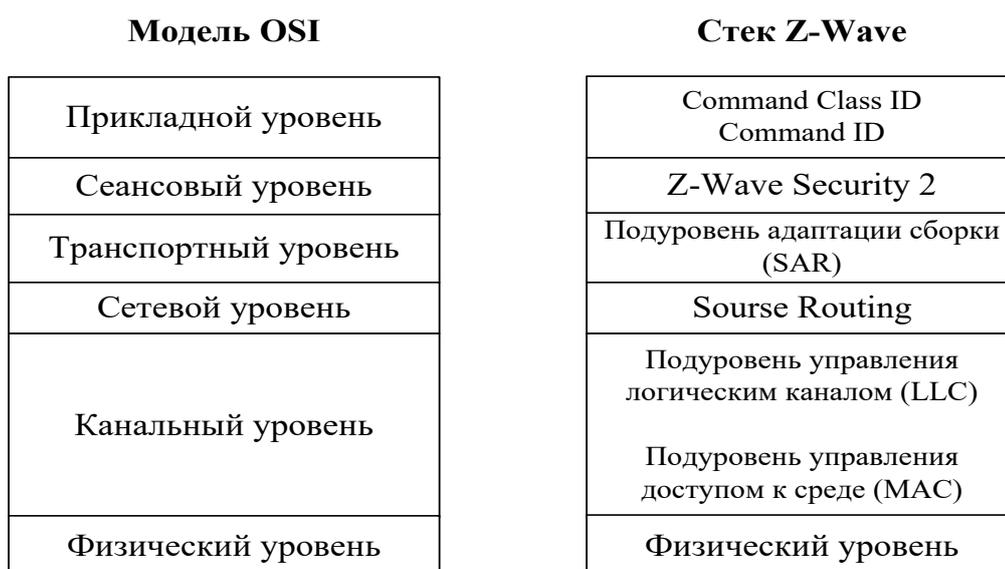


Рисунок 12 – Соотношение стека протоколов модели OSI и Z-Wave

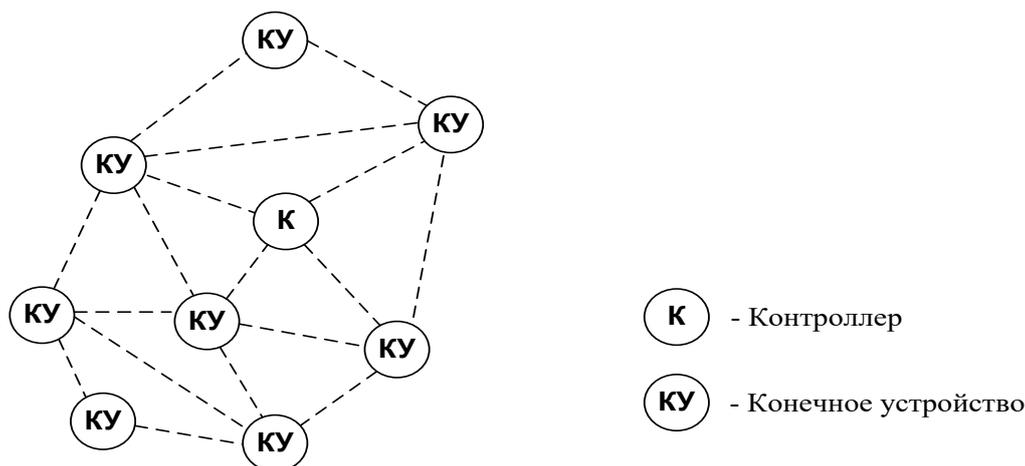


Рисунок 13 – Ячеистая топология сети Z-Wave

В версии Z-Wave Plus улучшены возможности самовосстановления и отказоустойчивость, унифицирована методика обновления прошивки по воздуху (OTA), и добавление новых устройств в сеть благодаря технологии Plug&Play с функцией Inclusion [5].

Технология Z-Wave обладает возможностью самолечения сети в случае, если какой-то узел не отвечает. Процедура Explorer Frame («Исследовательский кадр»), запускаемая автоматически, обновляет маршруты и осуществляет поиск «мертвых» узлов. С появлением этой процедуры стало возможным использование переносных устройств [5].

Благодаря функции ассоциации между устройствами, повышающей отказоустойчивость и быстродействие сети Z-Wave, одно устройство сети может отправлять команду другому устройству, находящемуся поблизости, минуя центральный контроллер.

С целью недопущения снижения эффективности сети допускается использование до 4 промежуточных узлов для транзитной передачи данных.

Указанные ограничения введены с целью снижения «предсказуемости» задержек при передаче и исключения перегрузки сети [5, 24].

Уникальность экосистемы Z-Wave заключается в совместимости устройств между собой в отличие от других беспроводных технологий. Совместимость подтверждается процессом сертификации [5, 24]. К существенным недостаткам протокола можно отнести низкую скорость передачи данных, по сравнению с остальными протоколами, рассматриваемыми в данной статье.

### **Заключение**

В независимости от радиуса действия Интернет вещей станет важной частью жизни уже в течение ближайшего времени. Беспроводные сети получили повсеместное распространение и их роль, распространение и значение в повседневной жизни будет только расти. В настоящее время беспроводная связь ближнего радиуса действия строится в основном на стандартах Bluetooth, UWB, ZigBee и Wi-Fi, которые базируются на стандартах IEEE802.15.1, 802.15.3, 802.15.4 и 802.11a/b/g/ah соответственно. Указанные стандарты IEEE определяют физический (PHY) и MAC-уровни для беспроводной связи в диапазоне действия около 10-100 метров.

802.11ah считается наиболее перспективной технологией следующего поколения Wi-Fi для крупномасштабных приложений Интернета Вещей с низким энергопотреблением, сочетающей в себе поддержку высокой скорости передачи данных на дальние расстояния, низкое энергопотребление, малую задержку, а также значительному сокращению коллизий при доступе к каналу благодаря встроенным механизмам. Более того, 802.11ah как и 6LoWPAN поддерживает протоколы

транспортного уровня IPv4/IPv6, что упрощает сетевую инфраструктуру и снижает накладные расходы. Стоит отметить, что при всех достоинствах 802.11ah имеет и недостатки – обеспечение целостности информационного обмена, а также низкий уровень мощности сигнала на дальних расстояниях, решаемые, впрочем, выбором оптимального протокола маршрутизации и безопасности.

Несмотря на то, что все рассматриваемые технологии и стандарты ближнего радиуса действия имеют встроенные алгоритмы шифрования и аутентификации, построение ячеистых (многоскачковых) сетей накладывает свои требования в части обеспечения целостности. Учитывая тот факт, что ZigBee, BLE v5.0, 6LoWPAN, Wireless USB используют симметричный алгоритм блочного шифрования с размером блока 128 бит, это не является гарантом того, что стандарты устойчивы к взлому, тем более, что этот алгоритм сокращает полезную длину пакета данных на 20%.

Технология ZigBee, построенная поверх стандарта 802.15.4, может удовлетворить более широкий спектр реальных задач, чем, например, Bluetooth, благодаря длительной работе от батареи, гибкости и надежности архитектуры ячеистой сети. Однако, жесткая привязка к зашумленному диапазону 2,4 ГГц, не только ZigBee и Bluetooth, 6LoWPAN и др. является существенным недостатком.

Технология Z-Wave, являющаяся уникальной с точки зрения совместимости устройств от разных производителей, чем не может похвастать ZigBee, имеет низкую скорость передачи данных и малое количество поддерживаемых устройств. Многофункциональная технология UWB так и не получила распространения на территории России.

Беспроводные технологии быстро меняются в след за потребностью рынка Интернета вещей, но неизменными остаются требования к энергопотреблению устройств, безопасности передачи данных, высокой отказоустойчивости сети, способности устройств противостоять радиопомехам и простота подключения. Выбирая технологию необходимо тщательно взвешивать все эти факторы.

В дальнейшем планируется проанализировать протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях с целью выбора оптимального, а также рассмотреть методы обеспечения информационной безопасности в беспроводных самоорганизующихся сетях и выработать наиболее эффективный с точки зрения обеспечения аутентификации и идентификации устройств.

### **Список источников**

1. Аникин. А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных в частотных диапазонах ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) и 434/868 МГц // Беспроводные технологии. 2011. № 4 (25). С. 6-12.
2. Дубровин В.С., Колесникова И.В. Сверхширокополосные системы связи, особенности и возможности применения // Электроника и информационные технологии. 2009. № 2(7). С. 19.
3. Колыбельников А.И. Обзор технологий беспроводных сетей // Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 2 (14). С. 3-29.
4. Лях М.Ю., Семенов О.Б. Использование сверхширокополосных сигналов для персональных беспроводных компьютерных сетей // Журнал Technology@Intel. 2003. URL: [http://www.cs.vsu.ru/~kas/doc/infonets/infonets08\\_3.pdf](http://www.cs.vsu.ru/~kas/doc/infonets/infonets08_3.pdf)

5. Обзор стека протокола Z-Wave. Библиотека умного дома Алексея Ровдо. URL: <http://www.rovdo.com/z-wave-stack>
- 6 Праздник к нам приходит: ГКРЧ расширила ISM-диапазон 868МГц в два раза. 2018. URL: <https://habr.com/ru/post/425903/>
7. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 2. Ближний радиус действия // Control Engineering. 2018. URL: <https://controleng.ru/besprovodny-e-tehnologii/putivoditel-iot-2/>
8. Сетевая инфраструктура системы РТЛС. URL: <http://www.rtlsnet.ru/technology/view/3>
9. Смирнова Е.В., Пролетарский А.В. Технологии современных беспроводных Wi-Fi сетей. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. – 446 с.
10. Стандарт NB-IoT: применение и перспективы. 2019. URL: <https://wireless-e.ru/gsm/nb-iot/standart-nb-iot/>
11. Талаев А.Д., Бородин В.В. Стандарты LPWAN для группового взаимодействия мобильных узлов // Труды МАИ. 2018. № 99 URL: <http://trudymai.ru/publoshed.php?ID=91985>
12. Финогеев А.Г. Беспроводные технологии передачи данных для создания систем управления и персональной информационной поддержки. URL: <http://window.edu.ru/resource/177/56177/files/62331e1-st18.pdf>
13. Фролов А.А. Анализ современных стандартов: MCWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a для применения в СШП-системах // Т-сomm: телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 9. С. 144-148.

14. Шевцов В.А., Бородин В.В., Крылов М.А. Построение совмещенной сети сотовой связи и самоорганизующейся сети с динамической структурой // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66417>
15. Carles Gomez, Joaquim Oller, Josep Paradells. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology // Sensors, 2012, vol. 12 (9), pp. 11734 - 11759. DOI:[10.3390/s120911734](https://doi.org/10.3390/s120911734)
16. Gee Keng Ee, Chee Kyun Ng. et al. A Review of 6LoWPAN Routing Protocols // Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network 30, 2010. DOI:[10.7125/APAN.30.11](https://doi.org/10.7125/APAN.30.11)
17. IEEE 802.15.4 -2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. URL: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_15\\_4-2020.html](https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html)
18. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specification for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks // IEEE Computer Society, 2012. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/6190698](http://ieeexplore.ieee.org/document/6190698)
19. Jonas Olsson. 6LoWPAN demystified. Texas Instruments, 2014. URL: <https://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>
20. Karunakar Pothuganti, Anusha Chitneni. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. 2014. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Nicole-Angelyn-Lopez/publication/309669667/>
21. Le Tian, Serena Santi, Amina Seferagic. Wi-Fi HaLow for Internet of Things: An up-to-date survey on 802.11ah research // Journal of Network and Computer Applications, 2021, vol. 182 (6). URL: [https://www.researchgate.net/figure/Existing-research-on-TIM-Segmentation\\_tbl5\\_350047434\\_k\\_802.11\\_ah2016](https://www.researchgate.net/figure/Existing-research-on-TIM-Segmentation_tbl5_350047434_k_802.11_ah2016)

22. Marco Centenaro, Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, and Michele Zorzi. Fellow Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios // IEEE Wireless Communications, 2015, vol. 23 (5), DOI:[10.1109/MWC.2016.7721743](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743)
23. Martin Wooley. Bluetooth Core Specification Version 5.0. Feature Enhancements. URL: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-5-go-faster-go-further/>
24. Nicole Angelyn T. Lopez, John Ryan B. Pasaoa, Justin A. Parado, Joshua O. Morales. A Comparative Study of Thread Against Zig Bee Z-Wave Bluetooth and Wi-Fi as a Home-Automation Networking Protocol, 2016. DOI:[10.13140/RG.2.2.36693.22249](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36693.22249)
25. The Differences Between Z-Wave Versions Made Easy. URL: <https://wltid.org/posts/the-differences-between-z-wave-versions-made-easy>
26. Weiping Sun, Munhwan Choi, Sunghyun Choi. IEEE 802.11 ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1GHz // Journal of ICT Standardization, 2013, vol.1 (1). DOI:[10.13052/jicts2245-800X.115](https://doi.org/10.13052/jicts2245-800X.115)
27. What is Bluetooth mesh? URL: <https://support.bluetooth.com/hc/en-us/articles/360049491971-What-is-Bluetooth-mesh>
28. Wireless Universal Serial Bus Specification, 2005. URL: <https://studylib.net/doc/18886786/wireless-universal-serial-bus-specification?>

## References

1. Anikin. A. *Besprovodnye tekhnologii*, 2011, no. 4 (25), pp. 6-12.

2. Dubrovin V.S., Kolesnikova I.V. *Elektronika i informatsionnye tekhnologii*, 2009, no. 2 (7), pp. 19.
3. Kolybel'nikov A.I. *Trudy MFTI*, 2012, vol. 4, no. 2 (14), pp. 3-29.
4. Lyakh M.Yu., Semenov O.B. *Zhurnal Technology@Intel*, 2003. URL: [http://www.cs.vsu.ru/~kas/doc/infonets/infonets08\\_3.pdf](http://www.cs.vsu.ru/~kas/doc/infonets/infonets08_3.pdf)
5. *Obzor steka protokola Z-Wave. Biblioteka umnogo doma Alekseya Rovdo*. URL: <http://www.rovdo.com/z-wave-stack>
6. *Prazdnik k nam prikhodit: GKRCCh rasshirila ISM-diapazon 868MGts v dva raza*. 2018. URL: <https://habr.com/ru/post/425903/>
7. Rentyuk V. *Control Engineering*, 2018. URL: <https://controleng.ru/besprovodny-e-tehnologii/putivoditel-iot-2/>
8. *Setevaya infrastruktura sistemy RTLS*. URL: <http://www.rtlsnet.ru/technology/view/3>
9. Smirnova E.V., Proletarskii A.V. *Tekhnologii sovremennykh besprovodnykh Wi-Fi setei* (Technologies of modern wireless Wi-Fi networks), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2017, 446 p.
10. *Standart NB-IoT: primenenie i perspektivy*. 2019. URL: <https://wireless-e.ru/gsm/nb-iot/standart-nb-iot/>
11. Talaev A.D., Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2018, № 99 URL: <http://trudymai.ru/eng/publoshed.php?ID=91985>
12. Finogeev A.G. *Besprovodnye tekhnologii peredachi dannykh dlya sozdaniya sistem upravleniya i personal'noi informatsionnoi podderzhki*. URL: <http://window.edu.ru/resource/177/56177/files/62331e1-st18.pdf>
13. Frolov A.A. *T-comm: telekommunikatsii i transport*. 2012. T. 6. № 9. S. 144-148.

14. Shevtsov V.A., Borodin V.V., Krylov M.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66417>
15. Carles Gomez, Joaquim Oller, Josep Paradells. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology, *Sensors*, 2012, vol. 12 (9), pp. 11734 - 11759. DOI:[10.3390/s120911734](https://doi.org/10.3390/s120911734)
16. Gee Keng Ee, Chee Kyun Ng. et al. A Review of 6LoWPAN Routing Protocols, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network 30*, 2010. DOI:[10.7125/APAN.30.11](https://doi.org/10.7125/APAN.30.11)
17. *IEEE 802.15.4 -2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. URL: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_15\\_4-2020.html](https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html)
18. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specification for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks, *IEEE Computer Society*, 2012. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/6190698](http://ieeexplore.ieee.org/document/6190698)
19. Jonas Olsson. 6LoWPAN demystified. Texas Instruments, 2014. URL: <https://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>
20. Karunakar Pothuganti, Anusha Chitneni. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi, 2014. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Nicole-Angelyn-Lopez/publication/309669667/>
21. Le Tian, Serena Santi, Amina Seferagic. Wi-Fi HaLow for Internet of Things: An up-to-date survey on 802.11ah research, *Journal of Network and Computer Applications*, 2021, vol. 182 (6). URL: [https://www.researchgate.net/figure/Existing-research-on-TIM-Segmentation\\_tbl5\\_350047434\\_k\\_802.11\\_ah2016](https://www.researchgate.net/figure/Existing-research-on-TIM-Segmentation_tbl5_350047434_k_802.11_ah2016)

22. Marco Centenaro, Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, and Michele Zorzi. Fellow Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios, *IEEE Wireless Communications*, 2015, vol. 23 (5), DOI:[10.1109/MWC.2016.7721743](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743)
23. Martin Wooley. *Bluetooth Core Specification Version 5.0. Feature Enhancements*. URL: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-5-go-faster-go-further/>
24. Nicole Angelyn T. Lopez, John Ryan B. Pasaoa, Justin A. Parado, Joshua O. Morales. *A Comparative Study of Thread Against ZigBee Z-Wave Bluetooth and Wi-Fi as a Home-Automation Networking Protocol*, 2016. DOI:[10.13140/RG.2.2.36693.22249](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36693.22249)
25. *The Differences Between Z-Wave Versions Made Easy*. URL: <https://wltid.org/posts/the-differences-between-z-wave-versions-made-easy>
26. Weiping Sun, Munhwan Choi, Sunghyun Choi. IEEE 802.11 ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1GHz, *Journal of ICT Standardization*, 2013, vol.1 (1). DOI:[10.13052/jicts2245-800X.115](https://doi.org/10.13052/jicts2245-800X.115)
27. *What is Bluetooth mesh?* URL: <https://support.bluetooth.com/hc/en-us/articles/360049491971-What-is-Bluetooth-mesh>
28. *Wireless Universal Serial Bus Specification*, 2005. URL: <https://studylib.net/doc/18886786/wireless-universal-serial-bus-specification?>

Статья поступила в редакцию 10.01.2022

Статья после доработки 01.04.2022

Одобрена после рецензирования 07.04.2022

Принята к публикации 21.06.2022

The article was submitted on 10.01.2022; approved after reviewing on 07.04.2022;  
accepted for publication on 21.06.2022