

Технологии «Интернета вещей»

для сетей ISM нелицензируемого диапазона частот

В настоящее время существует множество самых различных технологий, которые предлагается использовать в приложениях «Интернета вещей» (IoT). Однако подход к их применению в различных направлениях IoT должен быть дифференцированным. Так, например, для систем уличного освещения нужна одна технология, для автомобильных парковок — другая, а для контроля расхода тепла и электроэнергии — третья... В статье рассмотрены основные характеристики наиболее популярных технологий IoT для сетей нелицензируемого диапазона частот: IEEE 802.15.4, ZigBee 3.0, Thread, 802.11ah, Bluetooth-v.4.2, LoRa, Sigfox, «СТРИЖ».

Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.
Victor.alexeev@gmail.com

Технологии LPWPAN диапазона ISM для IoT

Технические характеристики LPWPAN диапазона ISM

К устройствам, предназначенным для использования в проектах IoT, предъявляется ряд специальных требований. Наиболее важные из них — минимальное энергопотребление при оптимальной функциональности. Устройства подобного типа, использующие автономное батарейное питание, должны обеспечивать работу без замены батареи в течение нескольких лет. Кроме того, важное значение имеют и другие факторы, такие, например, как объем и периодичность передаваемой информации, скорость передачи, радиус действия сети, топология,

дуплекс или симплекс, количество устройств в сети, сетевая инфраструктура в данном регионе, совокупная стоимость устройства, монтажа и эксплуатации и другие.

В этой статье мы ограничимся рассмотрением только PAN стандартов IEEE 802.15.4, ZigBee 3.0, Thread, 802.11ah, Bluetooth-BLE.

Основные технические характеристики персональных и локальных сетей малой мощности (Low Power Wireless Personal Area Network, LPWPAN) приведены в таблице 1.

Стандарт IEEE 802.15.4

Стандарт IEEE 802.15.4 регламентирует параметры батарейных устройств радиосвязи диапазона ISM, предназначенных для работы на небольших расстояниях с малыми скоростями.

Таблица 1. Основные технические характеристики персональных и локальных сетей LPWPAN

Технология	802.15.4	ZigBee, 802.15.4	Thread, 802.15.4	Bluetooth BLE, 4.2	Wi-Fi, 802.11ah
Основной диапазон частот	2,4 ГГц, 915 и 868 МГц	2,4 ГГц			Европа: 5 каналов 863–868 МГц
Дополнительный диапазон частот	Ultra-Wide-Band (UWB), <1 ГГц, 3–5 и 6–10 ГГц	915 и 868 МГц	США: 26 каналов 902–928 МГц		
Базовый метод	Расширение спектра с кодом прямой последовательности DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)		FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)		OFDM
Модуляция в диапазоне 868 и 915 МГц	Двоичная фазовая манипуляция (BPSK)				BPSK, QPSK, QAM
Модуляция в диапазоне 2400–2483,5 МГц	Квадратная фазовая манипуляция со сдвигом (O-QPSK)		GFSK-модуляция (гауссовская частотная манипуляция)		
Метод доступа	Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением конфликтов (CSMA-CA)				DL MU-MIMO
Интернет-протоколы	6LowPAN, IPv6 и UDP				
Типовая мощность передатчика	0–1 мВт		От –20 до +10 дБм, (PAVG, EIRP)		100 мВт
Типовой радиус действия	10–75 м		BLE v4.2 — до 150 м		до 1000 м
Скорость передачи	20–256 кбит/с		BLE 4.2 — до 1 Мбит/с (пропускная способность 260 кбит/с)		От 0,15 Мбит/с (1 канал 1 МГц) до 234 Мбит/с (256-QAM, объединение каналов 16 МГц)
Базовая топология	Star, Peer-To-Peer		Mesh	Star, Peer-To-Peer	Star
Расширенная топология	Mesh (с дополнительным ПО)		Mesh (через IEEE 802.11s)		

При разработке этого стандарта учитывались две основные цели: минимальная стоимость и предельно низкое энергопотребление.

Базовые радиотехнологии и протоколы 802.15.4 описаны в стандартах 802.15.4a/b. Непосредственно в этих спецификациях оговариваются диапазон частот, тип модуляции, структура пакетов, правила формирования контрольной суммы, способы предотвращения коллизий и т. д. Стандарты 802.15.4c и 802.15.4d разработаны для Китая и Японии. Стандарт 802.15.4e предназначен для промышленных приложений. В стандарте 802.15.4f рассмотрены устройства RFID. Стандарт 802.15.4g разработан для интеллектуальных инженерных сетей [1].

IEEE 802.15.4 описывает два нижних уровня модели OSI (Open Systems Interconnection basic reference model): физический уровень (PHY) и уровень управления доступом к радиоканалу (MAC-layer) для трех нелицензируемых диапазонов с центральными частотами 2,4 ГГц, 915 и 868 МГц. В этих частотных интервалах для обмена данными зарезервировано 27 каналов.

Кроме уровней PHY и MAC, в 802.15.4 дополнительно рассмотрены уровень управления логической передачей данных (LLC) и подуровень конвергенции специальных сервисных функций (SSCS), которые предназначены для согласования различных технологий. На физическом уровне 802.15.4 (PHY) определяются основные параметры приемопередатчиков, включая методы кодирования/декодирования и механизмы, которые используются для обеспечения требуемой скорости передачи в зависимости от среды.

Используемый в технологии 802.15.4 метод модуляции DSSS отличается высокой надежностью связи, устойчивостью к шумам и наводкам. Поэтому устройства 802.15.4 могут уверенно работать в районе мощных передатчиков других стандартов диапазона 2,4 ГГц.

В диапазонах 868 и 915 МГц допустимо использование как двоичной, так и квадратурной фазовой манипуляции с возможностью динамического переключения между поддерживаемыми частотными слоями.

Модуляция O-QPSK подразумевает эффективные нелинейные методы переключения мощности передатчика, позволяющие минимизировать энергопотребление. В диапазоне 2450 МГц допускается также использование комбинации двоичного кодирования и амплитудной манипуляции. Кроме того, стандарт 802.15.4 предусматривает способ расширения спектра с применением линейной частотной модуляции Chirp spread spectrum (CSS).

Метод CSMA-CA дает возможность устанавливать связь без коллизий по одному каналу с несколькими устройствами в разные интервалы времени. Мобильные устройства стандарта 802.15.4 передают несколько раз в сутки небольшие по объему пакеты данных.

Радиус действия мобильных устройств технологии 802.15.4 зависит от мощности передатчика, среды распространения сигнала и может изменяться для устройств малой и средней мощности от 10 до 75 м. Мощные устройства (100 мВт) могут работать в зоне

прямой видимости на открытом воздухе на расстояниях до 1000 м.

IEEE 802.15.4 обеспечивает двустороннюю полудуплексную передачу данных, поддерживая при этом шифрование AES 128. Расширенная адресация в рамках IEEE 802.15.4 подразумевает использование 64-битных адресов.

В стандарте 802.15.4 рассматриваются два типа устройств различной сложности. Полностью функциональное устройство (Full Function Device, FFD) способно принимать и передавать данные, в том числе и чужие, по цепочке. Устройство с ограниченным набором функций (Reduced Function Device, RFD) — это самый простой тип, который может только переговариваться с координирующим устройством. При объединении в сеть RFD может использоваться только в топологии Star. Любая сеть должна иметь по крайней мере один FFD, который будет работать как координатор сети. Стандарт 802.15.4 не определяет другие, более высокие слои и совместимость промежуточных слоев. Таким образом, разработчики получают полную свободу при проектировании новых устройств для сетей этого стандарта.

На стандарте 802.15.4 базируются технологии ZigBee, WirelessHART, MiWi, ISA100.11.

Крупнейшие мировые производители, например Texas Instruments (CC2630), Atmel (ATSAMR21G18A), Maxim Integrated (MAX2392) и другие, выпускают базовые чипы приемопередатчиков стандарта 802.15.4. Эти дешевые и простые в эксплуатации чипы позволяют даже небольшим малоизвестным фирмам создавать свою собственную продукцию и успешно конкурировать не только в своих странах, но и на международном рынке.

Технология ZigBee

Устройства ZigBee на уровнях PHY и MAC соответствуют полностью открытому стандарту IEEE 802.15.4. Аббревиатура ZigBee обозначает саму технологию и стек протоколов верхних уровней. В то время как стандарт 802.15.4 описывает только два нижних уровня OSI (физический и канальный), технология ZigBee представляет полный набор всех уровней (сетевой, транспортный, сеансовый, представления и приложений). Поэтому правильнее говорить, что технология ZigBee опирается на стандарт 802.15.4 [2]. Наиболее важные аспекты технологии ZigBee запатентованы. Они определяют такие конкретные параметры, как уровень сети, протоколы безопасности, структуры приложения, алгоритмы и детальное программное обеспечение. Стек протоколов верхних уровней ZigBee закрыт и доступен только членам ассоциации ZigBee Alliance, отчисляющим в него ежегодные взносы. Рядовые пользователи имеют право покупать необходимый тип лицензии [2].

Основные параметры ZigBee приведены в таблице 1. Кроме отмеченных в стандарте 802.15.4 устройств FFD и RFD, в спецификации ZigBee определены также три типа логических устройств: координатор сети, маршрутизатор и оконечное устройство. Маршрутизатор отвечает за выбор пути доставки сообщения, передаваемого по сети от одного сетевого узла

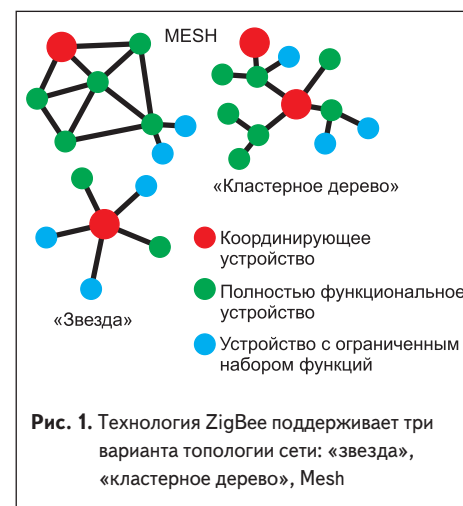
к другому. Координатор инициализирует сеть, управляет сетевыми узлами, хранит информацию о настройках каждого сетевого узла, задает номер частотного канала и идентификатор сети PAN ID.

Тип логического устройства при построении сети определяет сам пользователь на этапе выбора определенного профиля и программирования. Каждый узел сети имеет уникальный адрес. В зависимости от вида адресации, в сети может быть определено различное число логических получателей и источников информации (конечных точек). В технологии ZigBee предусмотрено использование нескольких видов адресации, начиная от стандартной 16-битной и заканчивая расширенной, 64-битной.

Если устройство не задействовано, то оно переходит в режим ожидания с минимальным расходом энергопотребления. При необходимости координатор активизирует только конкретное устройство, которое нужно для передачи информации в данный момент.

Для построения сетей ZigBee нужно иметь модули, включающие в себя трансивер 802.15.4, внешний микроконтроллер и проприетарное ПО со стеком протоколов ZigBee. Поэтому для разработки сетей беспроводной связи необходимо либо приобретать дополнительное дорогостоящее программное обеспечение и отладочные комплекты, либо воспользоваться полностью готовыми к работе модулями, которые предлагают такие известные производители, как, например, Atmel (ATSAMR21E18), CEL (ZICM357P2-1-NF-B), Microchip (MRF24J40MD-1/RM) и др. Разнообразие верхних уровней у различных производителей не мешает разным сетям ZigBee взаимодействовать друг с другом. Последняя спецификация ZigBee 3.0 унифицирует существующие в рамках альянса ZigBee Alliance профили специальных приложений разных производителей и позволяет различным устройствам общаться напрямую.

Основные преимущества технологии ZigBee: микропотребление, большое количество узлов в сети (до 65536) и различные виды топологии сети, например «звезда», Mesh, «кластерное дерево» (рис. 1) [2]. В отличие от Wi-Fi и Bluetooth, которые не могут поддерживать самоорганизующиеся сети, ZigBee может работать с топологией Mesh, относящейся к классу



Ad Hoc, что является одним из основных преимуществ этой технологии.

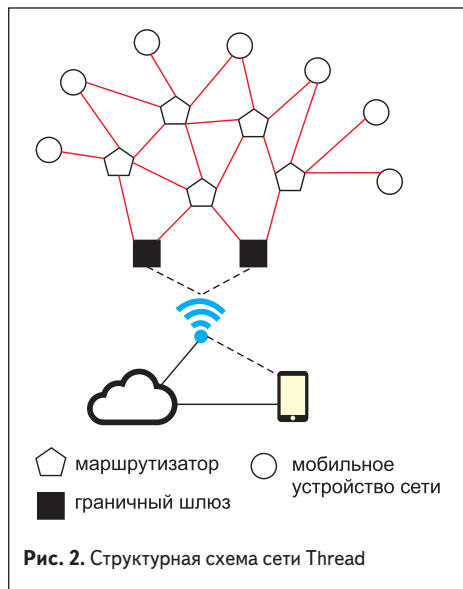
Более подробную информацию о сетях ZigBee можно найти на сайте [2].

Технология Thread

Новая технология Thread, так же, как и ZigBee, базируется на стандарте 802.15.4 и предназначена для устройств нелицензированного диапазона частот 2,4 ГГц. История этой технологии ведет отсчет с начала 2014 г., когда концерн Google приобрел американскую фирму Nest Labs, специализирующуюся на проектировании и производстве бытовых систем контроля климата (Nest Thermostat). Перед фирмой была поставлена задача создания нового протокола беспроводной связи, получившего название Thread. Таким образом, концерн Google начал в 2014 г. разработку собственной технологии, предназначенной специально для приложений «умного дома», объединяющей в единую экосистему сенсоры, контроллеры и активаторы (такие, например, как датчики влажности и температуры, системы отопления и охлаждения, тепловые насосы, увлажнители и осушители воздуха, вентиляторы и кондиционеры и т. д.).

По ряду причин ZigBee не подходит для этих целей: проприетарность стека протоколов, конфликты с протоколами IP для устройств различных производителей, непрерывный режим работы и значительное энергопотребление, проблемы безопасности. Поэтому Google (Nest) разработали IP-ориентированный протокол беспроводной связи Thread, предназначенный специально для устройств малой мощности в системах бытовой и офисной автоматизации.

Открытая технология Thread полностью соответствует первым двум уровням PHY и MAC стандарта 802.15.4. Поэтому в мобильных устройствах Thread можно использовать те же самые чипы, которые используются в устройствах ZigBee. Таким образом, основные технические параметры мобильных устройств (радиус действия, мощность, энергопотребление в режимах прием/передача) для ZigBee и Thread совпадают (таблица 1).



Основные отличия Thread заключаются в том, что на сетевом, транспортном и уровне данных использованы 6LoWPAN, IPv6 и UDP. Технология Thread позволяет задействовать IPv6 с длиной адреса до 128 бит. С помощью этой технологии мобильные устройства получают доступ к Интернету непосредственно через IP-протоколы. Следует отметить, что Thread не ограничивает использование специальных протоколов прикладного уровня. Поэтому в приложениях IoT, наряду с HTTP, могут быть использованы такие протоколы, как CoAP (Constrained Application Protocol), MQTT (formerly called Message Queue Telemetry Transport, XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), которые имеют в ряде случаев свои преимущества. Например, CoAP имеет значительно меньший размер заголовка, чем HTTP.

Полная открытость технологии Thread, обеспеченная использованием безлицензионных стандартов и протоколов, является одним из главных преимуществ, привлекающих производителей электронных компонентов. В настоящее время эту технологию поддерживают (contributor members) Atmel, Analog Device, Renesas, Siemens, STMicroelectronics и многие другие ведущие мировые вендоры [3].

Безопасность связи обеспечивается системой идентификации AES-smartphone, предоставляющей доступ к среде только авторизованным пользователям. Специальный алгоритм энергосбережения позволяет устройствам Thread работать с одной батареей емкостью 200 мАч в течение нескольких лет.

На рис. 2 показана структурная схема сети Thread.

Технология Thread поддерживает самонастраивающиеся ячеистые сети, содержащие до 250 мобильных устройств.

В структуре Thread присутствуют три типа устройств:

- граничный шлюз (Border Routers), обеспечивающий соединение сети 802.15.4 с другими сетями (Wi-Fi, Ethernet и др.);
- маршрутизатор (Routers), регулирующий соединение между узлами;
- конечное мобильное устройство сети — сенсор, активатор, контроллер и т. д.

Сеть Thread может содержать несколько граничных шлюзов. В случае выхода одного из них из строя данные переправляются по другому маршруту через другой граничный шлюз. Мобильное устройство, большую часть времени находящееся в спящем режиме, может взаимодействовать с остальными устройствами только через свой соседний маршрутизатор.

В 2016 г. на рынке появились первые модули с поддержкой Thread. В качестве примера можно привести модуль Telegesis ETRX3587 со встроенной памятью 512 кбайт (flash) и 64 кбайт (RAM), содержащей полный стек протоколов Thread Protocol [4]. Подробную информацию о Thread можно найти в [3].

Технология Bluetooth 4.2

В данной статье рассмотрены только доступные на момент написания статьи спецификации Bluetooth 4.2 и 5.0 Low Energy — BLE,

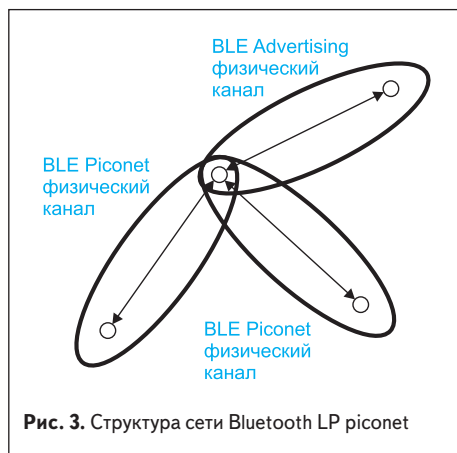
которые наиболее перспективны для приложений IoT. В технологии BLE небольшие пакеты данных передаются через заданные интервалы времени. Благодаря использованию специального алгоритма работы, при котором передатчик включается только на время передачи данных, в BLE удалось достигнуть очень малого энергопотребления. В режиме максимальной экономии питание на ядро не подается, и ток потребления составляет всего несколько микроампер. В этой технологии предусмотрены два типа устройств: «single-mode, поддерживающие работу только с BLE, и dual-mode, которые могут работать как с BLE, так и с Bluetooth 3.0 и 4.0.

В спецификации BLE используется метод псевдослучайной скачкообразной перестройки рабочей частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum) с 40 каналами шириной 2 МГц. Технические характеристики BLE 4.2 приведены в таблице 1. Теоретически возможная максимальная скорость BLE 4.2 составляет 1 Мбит/с. Однако нужно иметь в виду, что пропускная способность реального устройства, характеризующая окончательный объем данных на выходе передатчика, составляет примерно 260 кбит/с.

На уровне PHY и MAC устройства BLE соответствуют стандарту IEEE 802.15.1. В спецификациях BLE на физическом уровне используется GFSK-манипуляция.

В последнем рабочем варианте Bluetooth 4.2 введены IP Support Service (IPSS), профиль IPSP (Internet Protocol Support Profile), который определяет поддержку передачи пакетов IPv6 между устройствами, имеющими BLE. При передаче пакетов IPv6 используется стандарт 6LoWPAN, определяющий взаимодействие по протоколу IPv6 поверх сетей LP PAN. Указанные свойства значительно упрощают подключение устройств Bluetooth 4.2 к Интернету.

Сети BLE могут работать в топологии «звезда» и «точка–точка». При этом ведомое устройство способно общаться с мастером по отдельному физическому каналу. Структура сети BLE показана на рис. 3 [6]. В сетях Bluetooth LP piconet ведомое устройство отправляет мастеру приглашение на установление коммуникации. Мастер, который находится в спящем режиме, выходит на нормальный режим работы и устанавливает связь. Таким образом, количество ведомых в сетях Bluetooth LP piconet практически неограниченно.



В спецификации 4.2 введены усиленные меры безопасности LE legacy pairing/Secure Connections с использованием краткосрочных (Short Term Key, STK) и долговременных ключей (Long Term Key, LTK). Кроме того, в 4.2 используется алгоритм шифрования AES-CMAC с 128-битным ключом.

Сегодня на рынке существуют чипы с поддержкой BLE 4.2, например MKW41 (NXP), CC2640 (TI), EFR32BG1P332F256GMxx (Silicon Labs) и др.

В середине июня 2016 г. Bluetooth Special Interest Group анонсировала последнюю версию спецификации Bluetooth Low Energy 5.0. Как отмечается в пресс-релизе [7], при работе в режиме Low Energy в новой спецификации пропускная способность будет увеличена по сравнению с Bluetooth 4.2 в два раза. В спецификации 5.0 в режиме LE будет использоваться модернизированный механизм AMP (Alternate MAC/PHY) как дополнение к 802.11 для передачи высокоскоростного сообщения. Эффективная дальность возрастет в четыре раза. В новой версии 5.0 в восемь раз будет увеличена информационная емкость пакета за счет увеличения длины пакета до 255 октет.

Предполагается, что в новой версии появятся навигационные функции. Кроме перечисленных инноваций, ожидается увеличение количества одновременных подключений к одному модулю. В спецификации 5.0 также отмечается, что устройства с BLE смогут организовываться в Mesh-сети. Ожидается, что в коммерческую продажу чипы Bluetooth 5.0 поступят в 2017 г.

Спецификация IEEE 802.11ah Wi-Fi

На июнь 2016 г. семейство стандартов 802.11 Wi-Fi содержало 39 утвержденных и разрабатываемых спецификаций. Между собой 39 существующих сегодня спецификаций стандарта 802.11 различаются как на PHY, MAC, так и на верхних уровнях [8, 9]. В данной статье мы ограничимся рассмотрением только спецификации 802.11ah, которая представляет наибольший интерес для IoT.

Спецификация 802.11ah, принятая в 2016 г., отличается прежде всего тем, что использует фиксированную нелицензионную полосу частот в районе 900 МГц, а также небольшие скорости передачи данных при малой мощ-

ности и большом радиусе действия. Стандарт 802.11ah называют также Wi-Fi HaLow [10]. Технические характеристики IEEE 802.11ah приведены в таблице 1.

В стандарте 802.11ah для передачи данных используются переключающие точки доступа (Relay Access Points, RAPs) и сетевые станции (Network Stations, STAs). Выполняя функцию своеобразного реле, RAP обеспечивает обмен данными между точкой доступа и клиентом [11].

В спецификации 802.11ah предусмотрено распределение станций на группы. При этом доступ к определенной группе разрешается только в определенные моменты времени по заданному маршруту. На рис. 4 [12] показано распределение каналов в окнах постоянного ограниченного доступа (Restricted Access Windows, RAW) и периодически ограниченного доступа (Periodic Restricted Access Windows, PRAW).

В стандарте 802.11ah описываются три вида сетевых станций. Станции типа Traffic Indication Map (TIM) постоянно находятся в спящем режиме с минимальным энергопотреблением до тех пор, пока RAP не переведет его в активный режим передачи данных. Передача данных для этих станций разрешена в окне ограниченного доступа (RAW) в трех различных сегментах: смешанный (multicast, MC), вниз (downlink, DL) и вверх (uplink, UL). Станции типа Non-TIM stations спят и просыпаются по заранее заданному алгоритму Target Wake Time (TWT). Они напрямую связываются с точками доступа в окне периодически ограниченного доступа (PRAW). Станции типа Unscheduled stations могут самостоятельно выходить в эфир, например в экстремальных ситуациях.

Описанная структура позволяет существенно экономить энергозатраты. Благодаря этому сетевые станции 802.11ah могут работать с одной батареей в течение нескольких лет.

В системе адресации 802.11ah, кроме обращения к одной станции, дополнительно введен вызов группы станций (Delivery Traffic Indication Map, DTIM). Все сетевые станции могут быть сгруппированы по секторам, оснащенным специальным набором антенн. С помощью направленных потоков можно выделять отдельные сектора в сетях с перекрывающимися зонами действия точек доступа.

Непосредственно в стандарте 802.11ah в качестве базовой определена топология «звезда».

В этой топологии STAs подключены к RAP на уровне L2. Между собой сетевые станции могут взаимодействовать только через переключающую точку доступа. Топология Mesh на уровне L2 не прописана в стандарте 802.11ah. Кроме того, нет строгой регламентации на протокол взаимодействия различных RAP между собой.

Однако следует отметить, что построение сетей с RAP, подключенных по топологии Mesh, в принципе возможно с помощью привлечения технологии IEEE 802.11s [11]. Спецификация 802.11ah совместима с интернет-протоколами IPv4, IPv6 и стандартом.

В стандарте 802.11ah используется механизм контроля и предотвращения коллизий CSMA/CA. Поэтому при однонаправленном характере обмена данными в этом стандарте исключена возможность того, что две или несколько сетевых станций могут одновременно быть в связи с точкой доступа. Высокая производительность устройств 802.11ah позволяет им расходовать значительно меньше мощности по сравнению с другими спецификациями 802.11. Более подробная информация о спецификации 802.11ah приведена, например, в [12].

Технологии LPWAN нелицензируемого диапазона

Основные технические характеристики LPWAN диапазона ISM

Глобальные беспроводные сети с устройствами малой мощности LPWAN (Low Power Wide Area Network), работающие в нелицензируемом диапазоне частот, можно разбить на два основных класса:

- Широкополосные (Ultra Wide Band, UWB). Например, LoRa — один канал занимает полосу в эфире с шириной 125 или 250 кГц.
- Узкополосные (Ultra Narrow Band, UNB). Например, Sigfox и «СТРИЖ» — один канал занимает полосу в эфире с шириной 100 Гц.

От рассмотренных выше LPWAN технологий 802.15.4, ZigBee, Thread, BLE, 801.11ah стандарты LPWAN отличаются, прежде всего, большим радиусом действия (до 20 км).

В данной статье, среди множества разнообразных технологий безлицензионного диапазона LPWAN, мы рассмотрим наиболее популярные: LoRa, Sigfox, «СТРИЖ» и «ВАБИОТ».

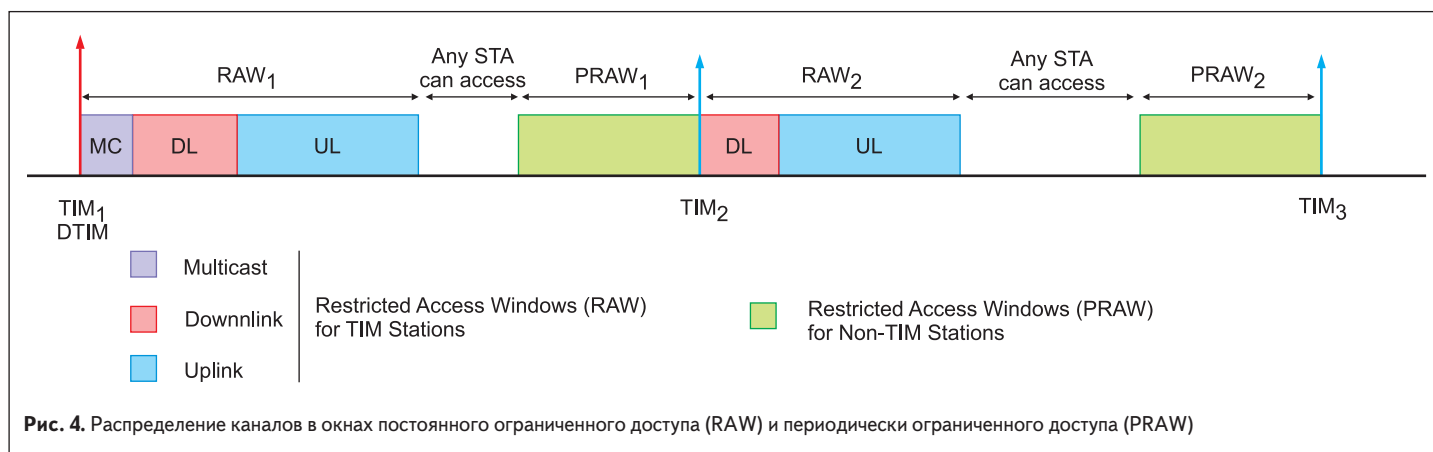


Таблица 2. Основные технические характеристики LPWAN диапазона ISM

Технология	LoRa	Sigfox	«СТРИЖ»
Основной диапазон частот, МГц	863–870 (Европа и РФ); 902–928 (США)		
Дополнительный диапазон частот, МГц	433 (Европа); 779–787 (Азия)		
Базовый метод	SSM, CSS	UNB; DBPSK (UL); GFSK (DL)	UNB; DBPSK; протокол Marcato 2.0
Ширина каналов (BandWidth)	7,8, 125, 250, 500 кГц	100 Гц (для активной работы доступно 500 кГц)	100 Гц (500 кГц доступно для работы БС)
Чувствительность приемника, дБм	-127 (Si461 SiLab)	-126 (chip AX-Sigfox)	-126 (chip AX-Sigfox), -152
Уровень обнаружения	Полезный сигнал на 19,5 дБ ниже уровня шумов	Полезный сигнал на 20 дБ выше уровня шумов	Уровень шумов: 5 дБм (моб. устройство), 10 дБм (БС)
Максимальный размер пакета, байт	256	12	Нет данных
Доступ в Интернет	IPv6, 6LoWPAN		
Радиус действия, км	3 – город, до 30 – прямая видимость	1 – город, до 20 – прямая видимость	3 – город, до 10 – прямая видимость (40-м антенна, 0 дБ)
Скорость передачи данных	От 30 бит/с до 50 кбит/с	От 100 бит/с (PSK) до 600 бит/с (FSK)	100 бит/с (TDIN rD)
Количество устройств в зоне БС	Десятки тысяч		
Базовая топология	«Звездная» (Star-of-stars)	«Звезда» (Star)	
Расширенная топология	Комбинации верхних уровней без стека LoRa		

Основные технические характеристики LPWAN диапазона ISM приведены в таблице 2.

Технология LoRa и сети LoRaWAN

Технология LoRa (Long Range) базируется на методе модуляции, разработанном и запатентованном Semtech Corporation, в котором объединены SSM и CSS (таблица 2). Эта технология обеспечивает надежную симметричную связь в обоих направлениях — UL и DL. В методе расширения спектра CSS используется внутриимпульсная частотная модуляция с линейным законом изменения мгновенной частоты во времени. Расширение спектра достигается за счет генерации чирп-сигналов (chirp signal), представляющих собой скалярное произведение входного сигнала и элементарных математических функций (чирплетов). Процесс кодировки в технологии LoRa реализован с помощью сдвига во времени кодирующего чирпа. Таким образом, на шкале времени весь промежуток передачи чирпа разделяется на интервалы, которые определяют саму шкалу. При этом кодируемый символ определяется положением скачка частот на этой шкале. Циклический сдвиг чирпа по времени позволяет кодировать один символ. В технологии LoRa каждый передаваемый символ соответствует четырем битам. В дополнение к этим битам данных передается как минимум один бит коррекции ошибок. Направление чирпа определяет его функциональность. Убывающие чирпы используются в кодировании LoRa для обозначения окончания преамбулы. Метод SSM,

применяемый в технологии LoRa, использует множество расширяющих сигналов одинаковой амплитуды, разнесенных по частоте. При этом каждый из компонентных сигналов кодируется с помощью псевдослучайной последовательности или специальной таблицы преобразования.

Поскольку в методе SSM используется принцип избыточности, технология LoRa очень устойчива к воздействию коротких импульсных помех. Комбинация методов CSS, SSM и FEC позволяет LoRa выделять полезный сигнал на уровне сильных помех за счет исключения каналов, в которых обнаружены узкополосные шумы (рис. 5) [14].

Благодаря асинхронной природе сигнала и тому, что модуляция LoRa значительно увеличивает базу сигнала (произведение эффективных значений длительности сигнала и ширины его спектра) и асинхронной природе сигнала, технология Semtech очень устойчива по отношению к интерференциям как внутри, так и за пределами рабочего диапазона. Кроме того, длительность символьных кадров в сообщениях LoRa больше, чем в системах с поддержкой FHSS. Это обеспечивает высокую степень фильтрации помех, обусловленных амплитудной модуляцией. Также следует отметить, что использование чирп-сигналов позволяет свести к минимуму искажения, обусловленные эффектом отражений в условиях городской застройки.

Технология LoRa позволяет демодулировать сигналы на уровне 19,5 дБ ниже уровня шумов. Более подробно технология модуляции LoRa описана в документе [14].

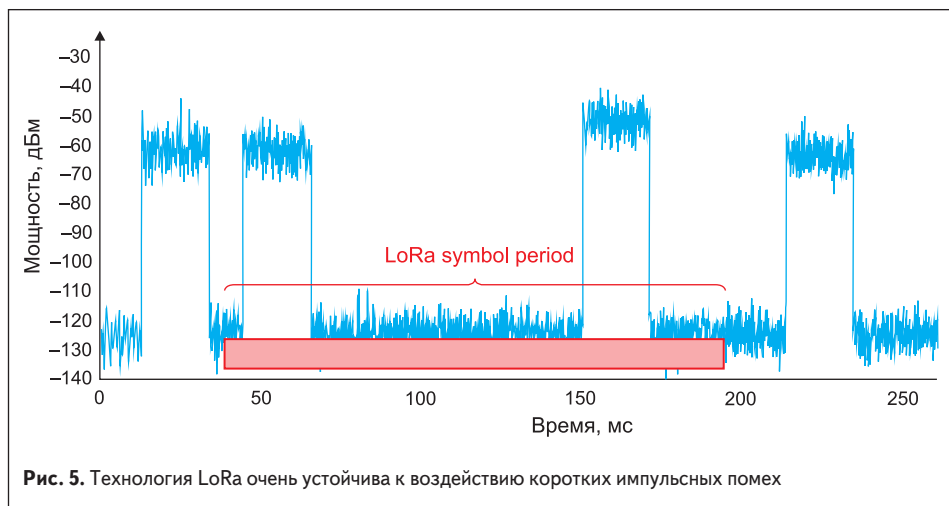


Рис. 5. Технология LoRa очень устойчива к воздействию коротких импульсных помех

Совокупность метода модуляции LoRa и стека протоколов верхних уровней поддерживается открытым сетевым стандартом LoRaWAN (Long Range Wide-Area Networks), разработкой и поддержкой которого занимается международное некоммерческое объединение LoRa Alliance [14].

На сегодня реализованы две версии стека протоколов LoRaWAN. Протокол LoRaMAC разработан фирмой Semtech, а протокол LoRaWANinC предложен концерном IBM. Для использования проприетарного программного обеспечения LoRa необходима лицензия Semtech.

К основным характерным особенностям LoRaWAN можно отнести мобильно перестраиваемые значения скоростей передачи данных и выходной мощности устройств, временное разделение доступа к среде, частотное разделение каналов, возможность демодулирования сигналов в одном частотном канале на разных скоростях.

В стандартном варианте сеть LoRaWAN состоит из сетевого сервера, сервера приложений, конечных мобильных устройств и шлюзов. Сетевой сервер (Network Server) — это главное управляющее устройство, координирующее работу всей сети LoRaWAN. Сервер приложений (Application Server) осуществляет удаленный контроль конкретных групп мобильных устройств (End Node). Шлюзы предназначены для связи LoRaWAN с другими сетями, например GSM, LTE, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth и т. д.

В сетях LoRaWAN регламентируются три класса конечных мобильных устройств:

- двунаправленные конечные устройства класса А (Bi-directional end-devices, Class A), используемые в случаях минимальной потребляемой мощности при приоритете передачи данных к серверу;
- двунаправленные конечные устройства класса Б (Bi-directional end-devices, Class B), обладающие дополнительным временным слотом приема данных по расписанию в определенное время;
- двунаправленные конечные устройства класса С с максимально возможным временным интервалом приема данных.

Базовые станции LoRa в общем случае представляют собой относительно простые, компактные устройства. В условиях городской застройки каждая базовая станция (БС) покрывает область

с радиусом около трех километров. Одним из преимуществ технологии LoRa является отсутствие платы за трафик. Теоретически, одна БС LoRa может обслуживать несколько десятков тысяч конечных устройств.

В технологии LoRa поддерживаются протоколы IPv6 и 6LoWPAN. На сетевом уровне используется шифрование AES с уникальным ключом сети (Unique Network key) EUI64, а на уровне приложений дополнительно применяется специальный ключ устройства (Device specific key) EUI128.

В зависимости от мощности сигнала скорость обмена выбирается автоматически (ADR) в диапазоне от 30 бит/с до 50 кбит/с. В сетях LoRaWAN могут быть использованы разнообразные варианты сетевой архитектуры, например Star («звезда») или комбинированная «звездная» топология — Star-of-stars (рис. 6).

Кроме того, технология LoRa позволяет конструировать самые разнообразные топологии, создавая собственные протоколы передачи данных поверх физического уровня LoRa и отказавшись от использования стека LoRaWAN.

В настоящее время наибольшее распространение получили узкополосные ISM-трансиверы Semtech серии SX123x, включающие восемь моделей. Также хорошо зарекомендовали себя трансиверы CC1120, CC1125 (Texas Instruments) и Si4460 (SiLabs). Из законченных модулей на базе этих чипов можно отметить RN2483 LoRa (Microchip), iM880a (IMST), XRange (Netblocks), mdot (MutliTech), RFM95W (HopeRF), LL-RXR-27 (Link Lab).

Более подробная техническая документация LoRaWAN доступна на сайте [14].

Технология Sigfox

Технология Sigfox, разработанная французским инженером Христофом Фауртетом (Christophe Fourtet) в 2008 г., соответствует спецификациям ETSI для классов модуляции Low Throughput Networks (LTN) и Ultra Narrow-Band (UNB). Эта технология поддерживается и сертифицируется французской фирмой Sigfox Société Anonyme. Эта же фирма является эксклюзивным производителем базовых станций Sigfox.

Структура Sigfox, напоминающая стандартные сети сотовой связи, содержит: асинхронные и синхронные мобильные устройства (nodes), базовые станции, шлюзы для выхода в 3G-сети, дата-центры, системы уведомительных сообщений, устройства удаленного контроля. Технические характеристики Sigfox приведены в таблице 2. Мобильные устройства конструктивно достаточно просты и относительно дешевы.

По словам автора технологии, Sigfox базируется на четырех основных принципах [15]: расширение спектра (Spread Spectrum, SS), беспроводная технология малой мощности с ультранизкой полосой (Ultra Narrow Band, UNB), программно определяемая радиосистема (Software-Defined Radio, SDR) и когнитивное радио (Cognitive Radio, CR).

В Sigfox используются те же самые принципы расширения спектра, что и в описанной в предыдущем разделе технологии LoRa. Существенным различием этих двух технологий является полоса пропускания. В технологии

Sigfox используется узкая полоса UNB, один канал занимает полосу шириной всего 100 Гц. В диапазоне частот 864–865 МГц для активной работы доступны 500 кГц. При этом Sigfox позволяет передавать в этой полосе информацию по сотням каналов, не перегружая работу основной БС. Так, например, 210 сигналов UNB Sigfox занимают всего около 4% ресурсов БС. Однако приемник БС в один момент времени может принимать только один UNB-канал.

Кроме расширения спектра и беспроводной технологии малой мощности с ультранизкой полосой, в основе технологии Sigfox заложены принципы SDR и CR. Суть SDR заключается в том, что трансиверы должны работать с максимально возможным количеством различных радиостандартов, в широком диапазоне частот с различными принципами модуляции и кодировки. В таких устройствах предельно упрощена аналоговая часть, а все задачи по декодированию и обработке сигналов возложены на программное обеспечение. Таким образом, в системах SDR на программном уровне реализованы функции, которые в традиционных схемах выполняют аппаратные компоненты, такие как конвертеры, фильтры, усилители, модуляторы/демодуляторы и т. д.

Термин «когнитивное радио» (cognitive — «познание») определяет систему управления, которая имеет отношение к процессу анализа информации, необходимой для решения определенной задачи, например поиску в сложном широкополосном радиочастотном спектре сигналов определенной частоты и модуляции. В современных системах CR+SDR подобные задачи решаются с помощью сложных математических моделей.

Мобильные устройства Sigfox могут передавать информацию в дата-центры аналогично тому, как, например, в сетях сотовой связи абоненты передают SMS друг другу на сервер коротких сообщений, используя сети определенного провайдера. БС передают данные на серверы Sigfox через логические каналы связи. Каждое сообщение отсылается с идентификационным ключом, привязанным к мобильному устройству.

Информация от мобильного устройства к БС Sigfox передается в виде трех пакетов на трех псевдослучайных частотах. Приоритет отдается передачам от мобильного устройства к базовой станции (UL). Сеансы передач в обратном направлении (DL) применяются значительно реже. Так, например, лучшие образцы мобильных устройств Sigfox позволяют передавать до 140 сообщений по 12 байт каждое в направлении UL, но не более четырех сообщений по 8 байт в направлении DL. При этом каждое сообщение пересылается трижды на разных частотах, что позволяет добиться высокой степени надежности передачи данных.

Технология Sigfox строго не регламентирует ни конструкцию, ни параметры мобильного устройства. Поэтому производители вправе создавать свои собственные варианты.

Следует отметить, что простота конструкции и небольшая цена привели к тому, что мобильные устройства Sigfox имеют существенное ограничение по чувствительности: они начинают устойчиво работать, только если полезный

сигнал превышает уровень шумов примерно на 20 дБ. В структуре Sigfox нет этапов инициализации связи и параметризации мобильного устройства, которое самостоятельно решает, когда ему нужно передать соответствующее сообщение. Основную часть времени (больше 99%) мобильное устройство Sigfox находится в спящем режиме и выходит на связь только по заданному графику. Кроме того, мобильное устройство может обращаться в сеть с просьбой о перезагрузке. Если сеть не ответит в течение 20 с, устройство перейдет в режим ожидания сообщения на заданной частоте.

В настоящее время компоненты для мобильных устройств Sigfox выпускают ведущие мировые производители, такие, например, как Atmel (ATA8520 transceiver), ON Semiconductor (AX-SIGFOX), Texas Instruments (CC112x transceiver), Silicon Labs (Si446X transceiver), ATIM (ARM-NANO module), Telecom Design (TD120x module), Telit (LE51-868 S module), StickNTrack (Asset Tracking), Whislte (PetTracking) и др. На базе этих чипов известные мировые производители выпускают готовые к работе модули Sigfox, дополненные современными микроконтроллерами и встроенным программным обеспечением. Например, модуль Telit LE51-868 S, Libelium Sigfox Waspote и др.

В архитектуре Sigfox используются свои собственные БС. Основная идея среды Sigfox заключается в том, чтобы возложить на БС все основные функции по обслуживанию мобильного устройства. В технологии Sigfox программное обеспечение БС является главным элементом системы и практически полностью обеспечивает обработку данных, полученных с мобильных устройств. Далее это сообщение направляется конечному пользователю через соответствующего оператора.

Лицензия на изготовление и эксплуатацию БС Sigfox принадлежит французской фирме Sigfox Société Anonyme. Одна из последних моделей этого типа оборудования SBS-T-902 v2.2 представляет собой достаточно сложный программно-аппаратный комплекс. Эта БС, кроме приема и обработки сигналов мобильных устройств, может передавать управляющие сообщения сети Sigfox [16].

Поддержку мобильных устройств Sigfox осуществляют примерно 60 операторов в различных

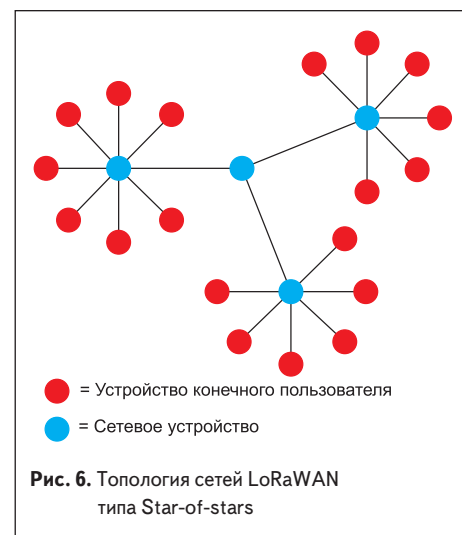




Рис. 7. Беспроводной счетчик LPWAN горячей и холодной воды компании «Телематические решения»

странах. В РФ лицензированные сети Sigfox не поддерживаются.

Узкополосная технология «ВАВИОТ»

Российская фирма «Телематические решения» предложила свой вариант технологии UNB для открытого диапазона ISM, которая получила торговое название «ВАВИОТ» (WavIoT). Эта фирма производит БС, мобильные устройства, предоставляет сетевые серверы, занимается монтажом и обслуживанием оборудования и является единственным оператором сетей «ВАВИОТ» [17]. В [18] отмечается, что в мобильных устройствах и БС «ВАВИОТ» применяются чипы Axsem.

Для управления модулем фирма использует свое собственное программное обеспечение, разработанное на базе собственного протокола NB-Fi, который используется в качестве протокола радиосвязи для модемов системы «ВАВИОТ» [17].

Основным элементом полевых устройств «ВАВИОТ» является модем, который осуществляет сбор данных и передачу информации на частотах безлицензионных диапазонов (в РФ — 868 МГц). Для передачи радиосигнала используется физическая модуляция DBPSK. Ширина полосы базовой станции составляет 500 кГц. При этом ширина полосы канала модема равна 100 Гц. Выходная мощность передатчика не превышает 25 мВт. Минимальная скорость передачи данных — 50 бит/с, в то время как максимальная скорость равна 25 600 бит/с. В режиме передачи ток потребления около 50 мА при мощности излучения 14 дБм. В системе «ВАВИОТ» поддерживается шифрование ХТЕА с уникальными ключами для каждого модема. Каждый модем имеет свой уникальный адрес, состоящий из трех байт.

Компания «Телематические решения» выпускает ряд интеллектуальных датчиков, объединяющих в себе сенсор, микроконтроллер и радиомодем (рис. 7), а также, как уже отмечалось, свои собственные БС. Как и в технологии Sigfox, в БС «ВАВИОТ» используется принцип SDR. Это дает возможность при соответствующей доработке программного обеспечения реализовать на данном оборудовании и другие протоколы LPWAN. БС «ВАВИОТ» обеспечивает покрытие до 10 км в городской среде и до 40–50 км в условиях прямой видимости конечных устройств [17]. По заявлению разра-

ботчиков, такая БС может обслуживать до 100 000 мобильных устройств. ■

Литература

1. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4a-2007.pdf>
2. www.zigbee.org/
3. <http://threadgroup.org/>
4. www.telegeis.com/products/etrx3-based-products/etrx3587-zigbee-module/
5. www.bluetooth.com/
6. www.summitdata.com/blog/ble-overview
7. www.bluetooth.com/news/pressreleases/2016/06/16/bluetooth5-quadruples-rangedoubles-speedincreases-data-broadcasting-capacity-by-800
8. <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11ae-2012.html>
9. www.google.bg/search?q=What+it+is+IEEE+802.11az&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=LQR5V_eSGojsQHAsLXACw
10. <http://mwrf.com/active-components/what-s-difference-between-ieee-80211af-and-80211ah>
11. <http://tools.ietf.org/html/draft-delpcarpio-6lowanah-00>
12. www.researchgate.net/publication/260268761_IEEE_80211ah_the_WiFi_approach_for_M2M_communications
13. www.google.com/patents/US7791415
14. www.lora-alliance.org/
15. www.slideshare.net/Reseauxetservicestpa/rs-10-juin-2015-sigfox-christophe
16. <https://fccid.io/pdf.php?id=2393011>
17. <http://waviot.tech/>
18. www.lightreading.com/iot/telia-betting-on-nb-iot-over-lora-sigfox/d/d-id/728497