

Технология Wi-SUN Alliance

для «Интернета вещей»

Среди многочисленных технологий LPWAN нелицензируемого диапазона сегодня многие разработчики начинают отдавать предпочтение сетям, которые разрабатывает и поддерживает международная некоммерческая организация Wi-SUN Alliance. Технология Wi-SUN, базирующаяся на хорошо известном стандарте 802.15.4g, отличается простотой и надежностью, а также обеспечивает совместимость работы в одной сети оборудования, разработанного различными производителями. Кроме того, технология Wi-SUN отличается от других повышенным уровнем безопасности, позволяющим использовать ее в системах сигнализации специального и военного назначения. Основные области применения этой технологии связаны с бытовыми и коммунальными приложениями, входящими в состав проектов «Умный дом» и «Умный город».

Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.

Стандарт IEEE 802.15.4g и Wi-SUN Alliance

Концепция четвертой промышленной революции Industry 4.0, включающая в себя IoT («Интернет вещей»), IIoT («Промышленный Интернет вещей»), IIoA («Интернет животных») и другие новейшие технологии, предусматривает «цифровизацию» многочисленных процессов повседневной жизни и их интеграцию в глобальную цифровую экосистему. Для этих направлений разработаны несколько вариантов беспроводных технологий, среди которых лидирующие позиции занимают технологии лицензируемого диапазона 3GPP Rel. 13 (ECGSM-IoT, LTE-MTC, NB-IoT) и технологии нелицензируемого диапазона ISM (LoRa, SigFox), статьи про которые были опубликованы в предыдущих номерах журнала [1, 2].

В последнее время, в связи с развитием аппаратной части, все большее внимание разработчиков привлекает технология беспроводных интеллектуальных общедоступных сетей (Wireless Smart Ubiquitous Network, Wi-SUN), базирующаяся на стандарте 802.15.4g.

Стандарт 802.15.4, разработанный в 2003 г., предназначен для систем, в которых не требуется передача данных на большие расстояния на высоких скоростях. Непосредственно в данном стандарте оговариваются диапазон частот, тип модуляции, структура пакетов, правила формирования контрольной суммы, способы предотвращения коллизий и т. д. Основные особенности устройств связи, работающих согласно стандарту 802.15.4, — минимальная стоимость и предельно малое энергопотребление.

Спецификации IEEE Std 802.15.4 регламентируют два нижних уровня модели OSI: физический уровень (PHY) и уровень управления доступом к радиоканалу (MAC) для нелицензируемых диапазонов частот ISM. PHY определяет методы кодирования/декоди-

рования и механизмы, которые используются для обеспечения требуемой скорости передачи в зависимости от среды передачи данных.

Современная редакция 802.15.4 определяет восемь физических уровней в зависимости от метода модуляции.

Спецификация 802.15.4 определяет четыре скорости передачи данных: 250, 100, 40 и 20 кбит/с. При радиусе действия 10 м максимальная скорость передачи данных в стандарте 802.15.4 составляет 250 кбит/с. При минимальной скорости 20 кбит/с это значение возрастает до 100 м. Благодаря низкой скорости сети стандарта 802.15.4 получили название «низкоскоростные беспроводные персональные сети» (Low-Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPAN).

Регулирование совместного использования среды передачи данных определяется на уровне доступа к среде передачи данных (MAC). Именно на MAC-уровне устанавливаются базовые принципы взаимодействия сети из нескольких устройств. В базовом варианте в стандарте IEEE 802.15.4 LR-WPAN используются топологии «звезда» (Star) или «точка-точка» (Peer-to-Peer).

В стандарте 802.15.4 описаны два типа устройств различной сложности. Полнофункциональное устройство (Full Function Device, FFD) принимает и передает данные, в т. ч. чужие, по цепочке. Устройство с ограниченным набором функций (Reduced Function Device, RFD) относится к самому простому типу. Оно может только переговариваться с координирующим устройством. При объединении в сеть RFD-устройство используется только в топологии «звезда». Любая сеть должна иметь, по крайней мере, одно FFD-устройство для работы в качестве координатора сети. Каждое устройство имеет 64-бит идентификатор. Внутри каждой персональной сети (Personal Area Network,

PAN) для соединения может использоваться упрощенный 16-бит идентификатор.

Сам 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.

Все версии стандарта используют одну и ту же базовую радиочастотную и протокольную структуру, основные параметры которой прописаны в главных спецификациях 802.15.4a/b. Стандарты 802.15.4c и 802.15.4d предназначены соответственно для Китая и для Японии. Спецификация 802.15.4e используется в оборудовании, предназначенном для промышленных приложений. В стандарте 802.15.4f регламентированы параметры устройств для активной (с батарейным питанием) радиочастотной идентификации (RFID).

Стандарт 802.15.4g был разработан в 2012 г. (Approved by IEEE, March 2012) специально для Wi-SUN. Устройства этого стандарта поддерживаются в рамках международной некоммерческой организации Wi-SUN Alliance, образованной в 2012 г. в США [3]. Штаб-квартира альянса расположена в шт. Делавэр (США). Региональные отделения находятся в Сингапуре, Японии и Европе.

В настоящее время в состав альянса входят около 130 крупнейших мировых фирм, таких как, например, Analog Devices, Cisco, Itron, Omron, Murata, Renesas, NIST, ROHM, TOSHIBA, Hitachi, Panasonic, General Electric, OKI и многие другие. Более 90 ведущих вендоров выпускают продукцию, сертифицированную Wi-SUN Alliance.

Wi-SUN Alliance по структуре, задачам и основным функциям напоминает хорошо всем знакомый Wi-Fi Alliance. Следует особо подчеркнуть, что Wi-SUN Alliance не разрабатывает стандарты и технологии. Эта организация адаптирует продукцию ее участников для совместного взаимодействия внутри сетей Wi-SUN. Поэтому Wi-SUN Alliance не является организацией, аналогичной IETF, которая разрабатывает ядро стандартов, таких, например, как 802.15.4g. Также следует обратить внимание на то, что в обязанности альянса не входит разработка верхних уровней приложений.

Основная задача Wi-SUN Alliance заключается в разработке коммуникационных протоколов, обслуживающих первые четыре слоя семилayers модели. Альянс сертифицирует продукцию различных производителей с целью максимально возможной совместимости их совместной работы в общих сетях. Схема, поясняющая основные задачи Wi-SUN Alliance, показана на рис. 1 [4].

Среди многочисленных функциональных обязанностей, выполняемых Wi-SUN Alliance, руководство этой организации выделяет, прежде всего, следующие:

- тестирование и сертификация совместимости устройств различных производителей, поддерживающих IEEE 802.15.4g и IPv6, предназначенных для работы в беспроводных сетях с топологией P2P/Mesh в системах управления приложениями коммунальной отрасли;

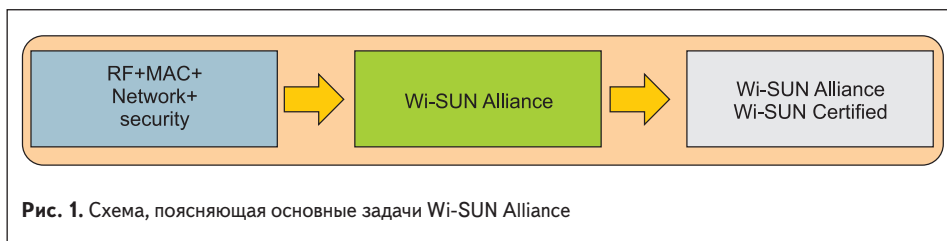


Рис. 1. Схема, поясняющая основные задачи Wi-SUN Alliance

- исследование специфических особенностей, функций и параметров конкретного пользователя сетей Wi-SUN Alliance;
- разработка на базе открытых стандартов коммуникационных профилей для каждого конкретного приложения в соответствии со специальными требованиями заказчика;
- разработка программ тестирования совместимости и сертификации оборудования конкретных производителей;
- проведение совместных маркетинговых программ по продвижению продукции членов альянса.

На базе стандарта IEEE 802.15.4g и протокола IPv6 альянс разрабатывает профили и проводит сертификацию как для домашних сетей (Home Area Network, HAN), так и для полевых сетей (Field Area Network, FAN). Одним из приоритетных для Wi-SUN Alliance является направление управления и контроля энергетических систем для домашнего пользования (Home Energy Management Systems, HEMS).

В качестве примера деятельности альянса на рис. 2 приведена структурная схема проекта HAN-FAN, в котором задействован коммуникационный протокол ECHONET [5] и японский универсальный интерфейс управления домашним оборудованием ECHONET Lite [6].

Направление домашних сетей (FAN) в проектах Wi-SUN Alliance курируют Cisco и Silver Spring Networks. Эти сети поддерживают скачкообразную перестройку в широком диапазоне частот, а также механизмы шифрования и идентификации.

Wi-SUN Alliance имеет долгосрочный договор о сотрудничестве с крупнейшим японским консорциумом (ECHONET Consortium), в состав которого входят ведущие мировые

производители электронного оборудования, поддерживающие коммуникационный протокол ECHONET [5]. Работы, связанные с направлением ECHONET, в Wi-SUN Alliance ведутся под руководством фирмы NICT, а технические вопросы решает концерн TOSHIBA. В этом направлении следует выделить два важных момента: поддержка коммуникационного протокола ECHONET и многофункционального программно-аппаратного интерфейса ECHONET Lite, для которых Wi-SUN Alliance разработал специальный сетевой профиль. Протокол связи ECHONET был разработан специально для проектов «Умный дом». Он позволяет контролировать с помощью смартфонов и гаджетов большинство бытовых приборов, таких, например, как кондиционеры, осветительное оборудование, сигнализация и т. д. [5]. Этот протокол поддерживают ведущие производители бытовой техники, входящие в ECHONET Consortium.

В октябре 2013 г. впервые был анонсирован японский счетчик электроэнергии ECHONET Lite, поддерживающий протокол IPv6 и имеющий сертификат IEC TC1000. Интерфейс и протокол обмена этого счетчика легли в основу универсального протокола для бытовых приборов. Согласно постановлению правительственных органов Японии, все электросчетчики, эксплуатируемые в стране, должны поддерживать ECHONET Lite. Этот протокол обеспечивает функцию поддержки двух коммуникационных интерфейсов, которая получила некоммерческое название Demand Side Oriented Approach. Один интерфейс (Supply side) предназначен для работы с оборудованием коммунальных служб (отопление, газ, вода, освещение) и используется для контроля и управления расходом электроэнергии в зависимости от климатических условий и за-

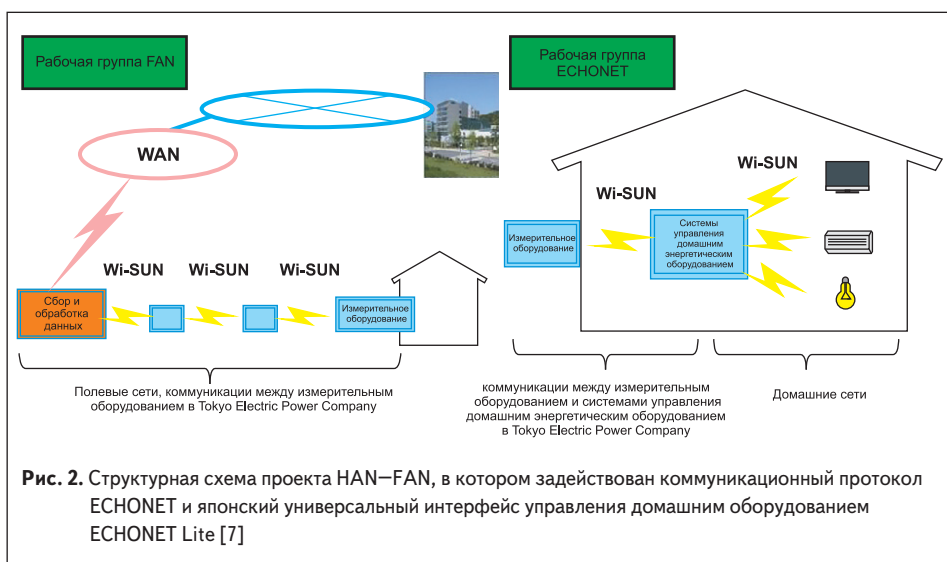
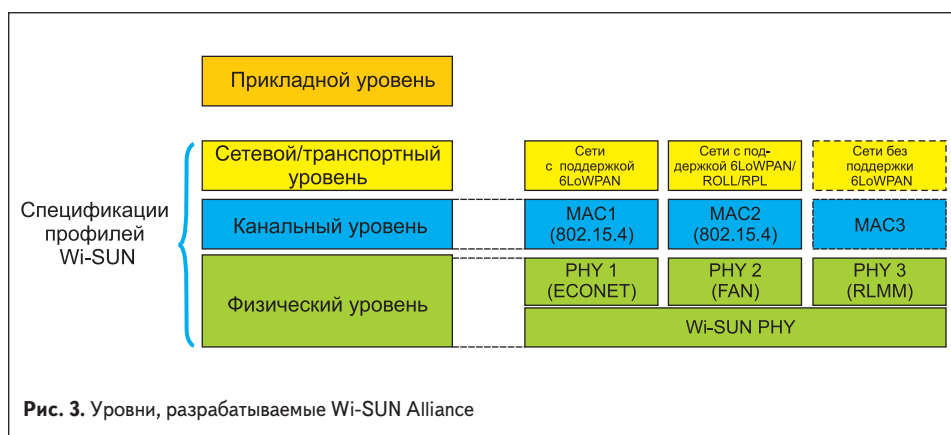


Рис. 2. Структурная схема проекта HAN-FAN, в котором задействован коммуникационный протокол ECHONET и японский универсальный интерфейс управления домашним оборудованием ECHONET Lite [7]



ложенного программного обеспечения. Второй интерфейс — Demand side — может быть применен для новых приложений IoT, в которых используются различные интеллектуальные датчики, например датчики открытия окон и дверей, детекторы движения, управление открытием/закрытием ворот, пожарные датчики, датчики температуры, влажности, состава воздуха и другие аналогичные.

Протокол ECHONET Lite обеспечивает подключение к домашним сетям до 80 различных приборов и сенсоров [6]. Ведущим производителем оборудования с поддержкой протокола ECHONET Lite является японский концерн Tokyo Electric Power Company (TEPCO).

Разработанный Wi-SUN Alliance протокол поддерживает IEEE802.15.4g/4e PHY/MAC, 6LoWPAN и IPv6. Отметим, что 802.15.4e представляет собой расширение базового стандарта для MAC-уровня промышленных приложений, в то время как 802.15.4g предназначен для небольших домашних сетей. Спецификация Wi-SUN Alliance соответствует стандарту TTC JJ300.10.

Wi-SUN

Высокопроизводительные интеллектуальные управляющие системы для домашнего и офисного оборудования, подключенные к SUN, становятся все более популярными во всем мире. Это связано, прежде всего, с тем, что в Wi-SUN Alliance вовлекается все больше ведущих мировых производителей бытовой и офисной техники, что позволяет создавать универсальные интеллектуальные сети, в которых одновременно используется оборудование различных производителей.

Wi-SUN Alliance разрабатывает собственные спецификации технических профилей (Technical Profile) физического уровня (PHY) и канального уровня (MAC). Кроме того, в случае необходимости альянс разрабатывает спецификации профилей для сетевого и транспортного уровней (рис. 3).

Как было отмечено выше, на физическом уровне устройства Wi-SUN соответствуют стандарту IEEE802.15.4g/4e.

В настоящее время для этих сетей используются диапазоны:

- 870–876 МГц и 915–921 МГц (Европа);
- 865–867 МГц (Индия);
- 902–928 МГц (США и Мексика);
- 902–907,5 МГц и 915–928 МГц (Бразилия);
- 915–928 МГц (Австралия и Новая Зеландия);
- 920 МГц (Япония);
- 2,4 ГГц (все регионы мира).

Кроме того, в специальных случаях, соответствующих регламентам конкретной страны или региона, могут быть использованы диапазоны: 169, 450–510, 780, 863–870, 896–960, 1427–1518, 2400–2483 МГц. Также допускается использование свободных каналов телевизионного диапазона (TVWS) и диапазона LECIM PHY (Low Energy Critical Infrastructure Monitoring) для частот 470–510 МГц в Китае и 863–870 в Европе (дополнение IEEE 802.15.4v) [8, 9].

В Wi-SUN уровень MAC строго не регламентируется. В зависимости от конкретного приложения этот уровень может либо соответствовать стандарту 802.15.4, либо использовать другой стандарт.

Скорость передачи данных в Wi-SUN может изменяться в диапазоне от 50 до 300 кбит/с.

Мощность передатчика может варьироваться в широком диапазоне от 50 мВт до 1 Вт. При конфигурации сети P2P дальность передачи между двумя устройствами с выходной мощностью 1 Вт составляет примерно 4 км. В перестраиваемых Mesh-сетях максимальное число сетевых сегментов равно шестнадцати. При этом суммарная дальность действия сети составит 64 км.

Для защиты от атак типа «отказ в обслуживании» (DoS) в Wi-SUN используются специальные методы шифрования (AES), аутентификации (PANA) и скачкообразной перестройки частоты, соответствующие стандартам ANSI 4957.200. Следует отметить, что в Wi-SUN используется оборудование, полностью соответствующее IEEE 802.15, а также стандартные протоколы TCP/IP, UDP и 6LoWPAN.

Спецификации профилей физического уровня соответствуют базовому стандарту для локальных сетей IEEE802.15.4g, расширению стандарта для промышленных сетей IEEE802.15.4e и расширенному частотному диапазону IEEE802.15.4v-2017. В зависимости от конкретного приложения профили могут иметь различные спецификации, например интеллектуальные сенсоры, системы контроля и управления домашними энергетическими устройствами, системы безопасности и т. д.

В настоящее время Wi-SUN Alliance поддерживает три формата PHY:

- MR-FSK: 2FSK и 4FSK;
- MR-OFDM;
- MR-O-QPSK (DSSS & multiplexed DSSS).

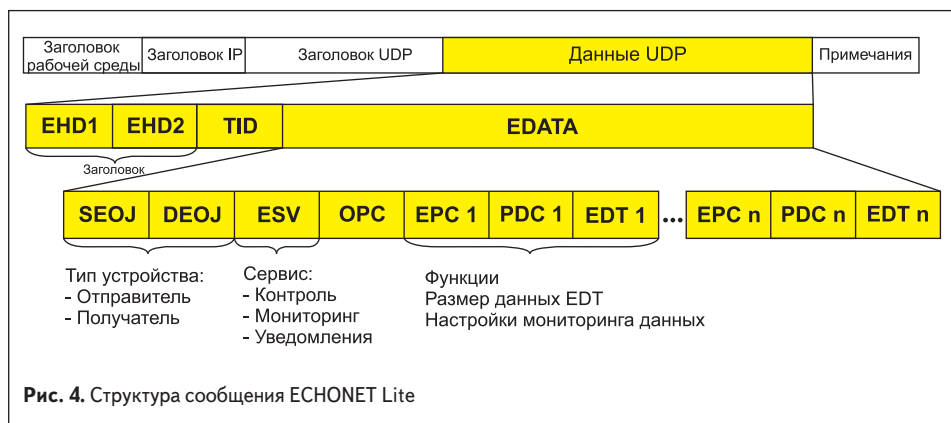
На сегодня Wi-SUN Alliance поддерживает следующие профили и программы сертификации:

- профиль домашних сетей (Home Area Network, HAN profile);
- профиль полевых сетей (Field Area Network, FAN profile);
- профиль Tokyo Electric Power Company (TEPCO Route B profile).

Профили TEPCO Route B и HAN поддерживают топологии «точка–точка» и «точка–много точек». В этих профилях также используется технология 6LoWPAN. Профили используют шифрование AES и аутентификацию PANA и полностью соответствуют стандарту TTC JJ300.10.

Как уже отмечалось выше, профиль HAN базируется на интерфейсе ECHONET Lite, который был разработан ECHONET Consortium [5] и поддерживается японской ассоциацией JSCA (Japan Smart Community Alliance). Этот интерфейс обеспечивает связь между домашними бытовыми приборами и системой контроля и управления HEMS (Home Energy Management System). На рис. 4 показана структура сообщения ECHONET Lite [11].

В сообщении, передаваемом по интерфейсу ECHONET Lite поверх UDP/IP, фреймы SEOJ и DEOJ содержат тип, назначение и адрес контролируемого устройства. В кадрах EPC, PDC, EDT записываются соответственно: выполняемая функция, размер полезной информации и непосредственно команда. Так, например, сообщение, адресованное домашнему кондиционеру через интерфейс ECHONET Lite, показано на рис. 5.



Сегодня более ста типов различных бытовых приборов поддерживают интерфейс ECHONET Lite. Ожидается, что к 2020 г. только в Японии будут использоваться более 60 млн устройств с поддержкой протоколов TEPCO Route B и HAN [12].

На рис. 6 показана схема уровней профиля FAN Wi-SUN в терминах модели OSI [13].

- Профиль FAN поддерживает:
- механизмы скачкообразной перестройки частоты (multi-hopping/frequency hopping);
 - самоорганизующиеся одноранговые сети, не требующие инфраструктуры, необходимой для стандартных сетей доступа;
 - стандарт IEEE802.15.4g/4e PHY/MAC;
 - протокол 6LoWPAN;
 - стандартные протоколы IPv6, TCP/UDP;
 - шифрование AES и аутентификацию в соответствии с 802.1x;
 - сжатие заголовков 6Lo;
 - протокол DHCPv6 для IP-адресации;
 - протокол RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks);
 - протокол интернет-сообщений ICMPv6 (Internet Control Message Protocol);
 - простую и многоадресную переадресацию (Multicast forwarding);
 - MAC-уровень для промышленных сетей на базе IEEE 802.15.4e + IE extensions;
 - автоматический поиск и подключение к сети;
 - протокол диспетчеризации в соответствии с IEEE 802.15.9;
 - сети Mesh в соответствии с ANSI 4957.210;
 - безопасность в соответствии с 802.1X/EAP-TLS/PKI Authentication;
 - ключи Temporal Key Integrity Protocol (TKIP) и Advanced Encryption Standard (AES);
 - стандарт ANSI 4957и частично ETSI-TS-102-887-2 Node 2.

Среди наиболее важных свойств Wi-SUN можно отметить технологию 6LoWPAN (LoWPAN IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks — «Передача пакетов IPv6 поверх маломощных беспроводных персональных сетей»). Она позволяет связать канальный уровень стека IP (link) с сетевыми уровнями (Network layers), что обеспечивает простой способ передачи сообщений IPv6 по радиоканалу IEEE 802.15.4, в частности по 802.15.4. Открытый стандарт 6LoWPAN описан в документе IETF RFC 6282. На рис. 7 показана схема, поясняющая принцип работы 6LoPAN [14].

Ячеистая (Mesh) сеть 6LoWPAN подключается к Интернету через внешний шлюз. Шлюз, играющий одновременно роль точки доступа, раздает подключение другим устройствам, например ноутбуку, планшету, смартфону.

6LoWPAN связана с IPv6-сетью через т. н. граничный маршрутизатор (Edge Router), который выполняет обмен данными между устройствами 6LoWPAN и Интернетом (или другой IPv6-сетью), локальный обмен данными между узлами (node) 6LoWPAN сети, а также обслуживает радиочасть сети.

Поддержка спецификации 802.15.4e позволяет использовать технологию 6LoWPAN не только в бытовых устройствах Wi-SUN с низким энергопотреблением, но также и в сетях промышленной автоматике.

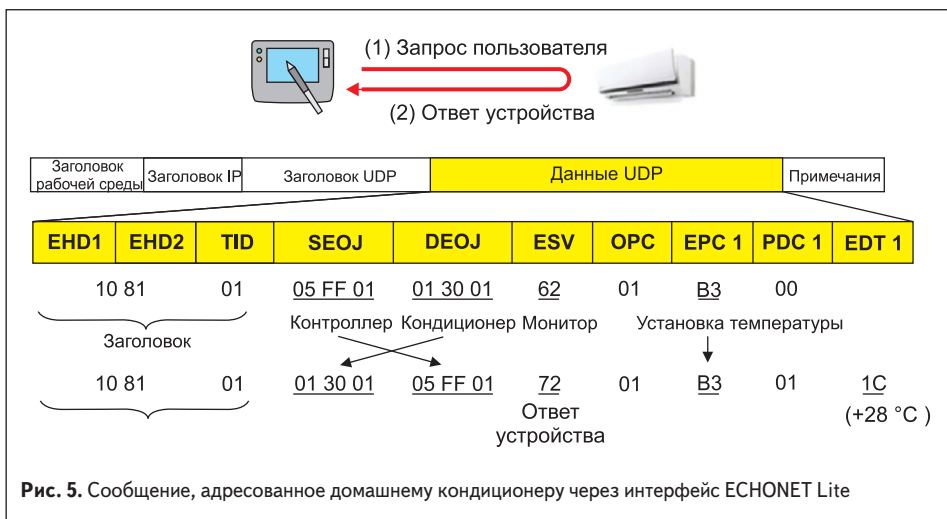


Рис. 5. Сообщение, адресованное домашнему кондиционеру через интерфейс ECHONET Lite

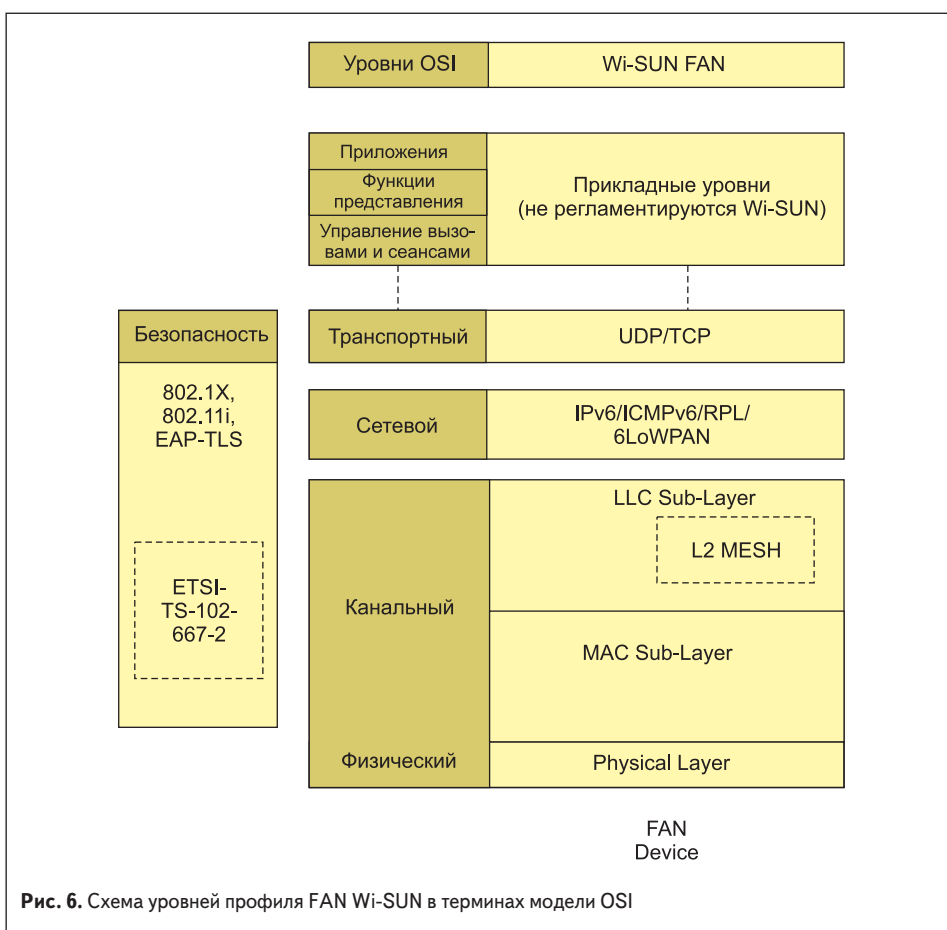


Рис. 6. Схема уровней профиля FAN Wi-SUN в терминах модели OSI

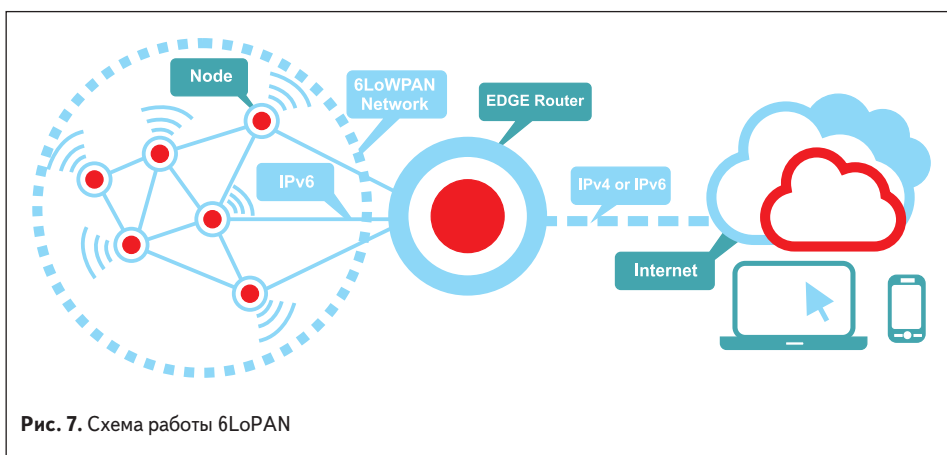


Рис. 7. Схема работы 6LoPAN



Рис. 8. USB-адаптер Toshiba 920 МГц для домашнего шлюза сетей Wi-SUN

В Wi-SUN применяется расширенная система безопасности. Аутентификация реализована по сертификатам, которые представляют собой набор атрибутов, идентифицирующих устройство и его изготовителя. В Wi-SUN используются сертификаты стандарта x.509, которые выдаются Центром Certificate Authority (CA), выступающим в роли гаранта подлинности сертификатов. Сертификат криптографически связан с закрытым ключом, который хранится у изготовителя оборудования (владельца сертификата). В системе безопасности Wi-SUN ключи генерируются с помощью специальных криптопроцессоров. Для хранения ключей используются аппаратные модули безопасности.

Защита Wi-SUN организована в соответствии со стандартом IEEE 802.11i, который предусматривает поддержку расширенного стандарта шифрования (Advanced Encryption Standard (AES)).

Схема сжатия заголовков 6LoWPAN позволяет значительно экономить ресурсы сети.

Использование протокола маршрутизации RPL (Routing Protocol for Low Energy and Lossy Networks) дает возможность передачи пакетов по соединениям с различными параметрами. Этот протокол был специально разработан для сетей с низким потреблением энергии (Low-Power) и сетей с потерями (Lossy Networks) [14].

Важным с точки зрения экономичной работы является то, что использование RPL позволяет хранить небольшие объемы служебных данных и таблиц маршрутизации, содержащих информацию о параметрах узлов в DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Это позволяет выбрать оптимальный маршрут и минимизировать время доставки пакетов. С помощью RPL можно создавать один или несколько DODAG. При этом каждому узлу соответствует определенный DODAG. Если в сети есть возможность работы с разными топологиями, то в этом случае каждому варианту соответствует определенный протокол RPL. Идентификатор RPL определяет целевую функцию, которая задается посредством DODAG.

Использование RPL обеспечивает:

- минимизацию объемов памяти, необходимой для хранения информации о маршрутах;
- уменьшение размеров кадров пакетов информации;

- организацию простых способов маршрутизации и пересылки;
- сокращение затрат на маршрутизацию и управление;
- оптимизацию потребления энергии;
- модернизацию полосы пропускания;
- применение простых и дешевых микроконтроллеров.

Wi-SUN FAN поддерживают TCP/IP, ModBus, что дает возможность подключаться через шлюзы ко многим проводным и беспроводным сетям, в том числе к Wi-Fi и LTE.

Одной из серьезных проблем направления Smart House является множество различных протоколов и методов управления устройствами IoT, которые ведущие производители разрабатывают для своей продукции. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Так, например, управлению голосом могут мешать посторонние шумы, управление жестами с помощью видеокмеры зависит от освещения, для использования гаджетов и смартфонов нужно дополнительное ПО.

Wi-SUN могут работать с ограниченным протоколом уровня приложения CoAP (Constrained Application Protocol). Этот протокол был специально разработан в качестве стандарта Интернета (RFC 7252) для простых устройств IoT, управляемых микроконтроллерами с размером памяти 10 и 100 кбайт кодового пространства (RFC 7228). По существу, CoAP является программным протоколом, предназначенным для общения простых электронных устройств через Интернет. Поскольку он базируется на RESTful, построение шлюзов, связывающих отдельные сети с разными протоколами, существенно упрощается. Например, CoAP позволяет серверам Wi-SAN работать в среде Windows, Linux или Android. Программирование устройств можно реализовать с помощью стандартного языка C (ANSI C12.22). Поддержка CoAP является несомненным преимуществом Wi-SAN, делая их более универсальными и привлекательными для различных производителей.

Из других специфических функций Wi-SUN можно отметить обобщенную концепцию моделирования с использованием языка общения с приборами учета энергии (Device Language Message specification, DLMS) и базовые требования международных стандартов для приборов учета электроэнергии (COmpanion Specification for Energy Metering, COSEM).

Также следует упомянуть возможность работы Wi-SUN с протоколом передачи данных DNP3 (Distributed Network Protocol), который используется для связи между различными типами устройств. В сетях с этим протоколом может работать до 65 520 устройств. DNP3 охватывает три уровня сетевой модели OSI: прикладной, канальный и физический. Данный протокол позволяет эффективно управлять устройствами со стандартными интерфейсами RS-232 и RS-485.

Все протоколы, используемые в Wi-SUN, подчиняются общим требованиям стандарта IEC 60870-5-104.

Устройства Wi-SUN

Устройства Wi-SUN могут обмениваться информацией с частотой один раз в 10 с. При

этом ток в режиме ожидания не превышает 2 мкА, а в режиме приема ток меньше 8 мА.

Члены Wi-SUN Alliance активно разрабатывают и продвигают свою продукцию во всех регионах мира.

Среди наиболее успешных проектов Wi-SUN Alliance можно отметить следующие:

- ITRON — расширенная линейка приборов контроля и измерения расхода воды, газа и электричества [16];
- Silver Spring — поддержка сетей Wi SUN [17];
- Cisco — ведущий производитель телекоммуникационного оборудования, руководитель проекта Wi-SUN FAN [18];
- NICT — радиомодуль 920 МГц со встроенным профилем Wi-SUN Profile for HAN [19];
- RENESAS — первый в мире чип 920 МГц с поддержкой Wi-SUN HAN/HEMS [20];
- Toshiba — бытовые приборы и оборудование с поддержкой Wi-SUN HEMS (Toshiba's 920 MHz wireless adaptor Wi-SUN Profile for ECHONET Lite) [21].

С ростом популярности LPWAN число членов альянса Wi-SUN Alliance постоянно увеличивается. Сегодня в сетях Wi-SUN по всему миру эксплуатируются десятки миллионов устройств, выпускаемых более чем 150 фирмами. Наиболее разнообразная номенклатура устройств с поддержкой Wi-SUN производится концерном Toshiba. В качестве примера на рис. 8 показан USB-адаптер Toshiba 920 МГц для домашнего шлюза Wi-SUN [22].

Беспроводной адаптер Toshiba's 920 MHz band wireless adaptor и шлюз Toshiba Lighting & Technology Corporation's home gateway поддерживают интерфейс ECHONET Lite и предназначены для домашних сетей Wi-SUN. Эти устройства могут быть использованы для контроля и управления интеллектуальными домашними приборами и контроллерами HEMS (Route B).

Увеличение количества производителей и производимых ими устройств вызывает необходимость координации их деятельности для обеспечения безопасной работы в сетях Wi-SUN. Учитывая это, в октябре 2017 г. Wi-SUN Alliance анонсировал свое решение о том, что сертификат аутентификации будет выдаваться единым Центром CA, в качестве которого выбрана американская фирма GMO GlobalSign [23]. Фирма GlobalSign является одним из лидеров рынка, разрабатывающих комплексные решения безопасности для сетей с высоким уровнем риска, таких, например, как «Умный дом» и «Умный город». Продукция GlobalSign ориентирована на обеспечение безопасности устройств IoT в интеллектуальных сетях с помощью новейших систем и методов шифрования и аутентификации.

Аутентификация на основе сертификатов CA по своей природе аналогична биометрическому паспорту. С помощью этого сертификата проверяется, были ли устройства подвержены внешнему вмешательству или перепрограммированию. При выявлении таких случаев система автоматически предотвратит повторное присоединение каких-либо скомпрометированных устройств к сети. Подобный подход, по заявлению руководителей альянса, выводит

Wi-SUN на лидирующие позиции в борьбе за освоение рынка проектов «Умный дом» и «Умный город».

Одним из ключевых видов деятельности альянса Wi-SUN является сертификация оборудования, которая осуществляется в специализированных лабораториях. Как правило, в таких лабораториях осуществляются два вида тестов. В первую очередь проводятся испытания на соответствие всем необходимым для данного класса оборудования международным стандартам — Conformance Test. На следующем этапе проводится тест на возможность совместной работы испытываемого оборудования с эталонным оборудованием, имеющим сертификат альянса — Certified Test Bed Unit (CTBU). Оба типа тестов затрагивают уровни PHY и MAC.

Кроме того, проводится отдельная проверка на соответствие требованиям ECHONET Lite. Для проведения тестов на соответствие ECHONET Lite испытательная лаборатория должна иметь сертификат ECHONET Consortium. Тесты соответствия требованиям ECHONET Lite состоят из двух частей. В ходе так называемой сертификации (Smart Meter Application Certification) проверяется базовое оборудование. Другая часть тестов, получившая название ECHONET Lite AIF (Application Communication Interface), контролирует совместимость интерфейсов оборудования различных производителей, предназначенного для приложений HEMS (Home Energy Management System).

К оборудованию, подлежащему тестированию ECHONET Lite AIF, относятся:

- низковольтные интеллектуальные счетчики электроэнергии;
- высоковольтные интеллектуальные счетчики электроэнергии;
- домашние кондиционеры;
- системы освещения;
- отопительное оборудование;
- проточные водонагреватели;
- генераторы электроэнергии на солнечных батареях;
- тепловые насосы;
- аккумуляторы тепла;
- электрические зарядные устройства;
- коммерческие кондиционеры;
- холодильное оборудование;
- контроллеры HEMS.

Сертификация может проводиться не только в собственных лабораториях Wi-SUN в США, но также и в других странах, в коммерческих лабораториях, имеющих аккредитацию альянса. В качестве примера такой лаборатории можно привести крупнейший японский испытательный центр Telecom Engineering Center (TELEC) [24].

Wi-SUN в сравнении с другими технологиями

LPWAN нелицензируемого диапазона

В Интернете не стихает дискуссия на тему, какая из технологий LPWAN нелицензируемого диапазона лучше с точки зрения IoT — LoRa, Sigfox или Wi-SUN [25–28].

Самой старой считается технология Sigfox, которая была разработана Христофом Фауртетом

(Christophe Fourtet) в 2008 г. В настоящее время эту технологию развивает и поддерживает французская фирма Sigfox Société Anonyme.

В оборудовании Sigfox используется технология Ultra Narrow Band (UNB) в сочетании с модуляцией DBPSK и GFSK. В UNB один канал занимает полосу шириной всего 100 Гц. В диапазоне частот 864–865 МГц для активной работы доступны 500 кГц. В отличие от Sigfox, в технологии LoRa применяется широкополосная CDMA-технология UWB (Ultra Wide Band), в которой один канал занимает полосу шириной 125 или 250 кГц. В этом заключается основное различие Sigfox и LoRa.

Базовый принцип физического уровня UNB PHY технологии Sigfox является наиболее простым по сравнению с другими технологиями. В варианте Sigfox небольшой (не более 12 бит) пакет бинарных данных с модуляцией BPSK передается с очень маленькой скоростью (100–300 бит/с).

Структура Sigfox напоминает стандартные сети сотовой связи. В состав оборудования сети входят: асинхронные и синхронные мобильные устройства (nodes), шлюзы для выхода в 3G-сети, оборудование 3G-сетей, дата-центры, системы уведомительных сообщений, устройства удаленного контроля.

Мобильные устройства Sigfox могут передавать информацию в дата-центры аналогично тому, как, например, в сетях сотовой связи абоненты передают короткие сообщения друг другу на сервер коротких сообщений, используя сети определенного провайдера. Каждое сообщение отсылается с идентификационным ключом, привязанным к мобильному устройству. Такой подход обеспечивает защиту от приема ложных сообщений.

В архитектуре Sigfox используется «полуоткрытая» модель. Эта технология подразумевает свои собственные базовые станции (БС). Основная идея среды Sigfox заключается в том, чтобы возложить на БС все основные функции по обслуживанию максимально простого мобильного устройства. Для использования сетей Sigfox необходимо приобрести лицензию Sigfox license. БС передают данные на серверы Sigfox, используя логические каналы связи. Кроме того, ПО верхнего уровня также принадлежит французской фирме Sigfox. В этом смысле технология Sigfox наполовину закрыта. Технологии Sigfox не регламентируют строго конструкцию и параметры непосредственно мобильного устройства. В этом заключается ее «полуоткрытость».

Мобильные устройства Sigfox работают в нелицензируемом диапазоне 868 МГц (Европа) с очень маленькой скоростью (около 300 бит/с) с небольшими пакетами данных (меньше 12 байт). Поэтому конструктивно они достаточно просты и относительно дешевы.

Для передачи данных от мобильного устройства Sigfox к БС (UL) используется стандартный

метод DBPSK (Phase-Shift Keying). Для передачи от БС к мобильному устройству (DL) используется частотное разделение GFSK (Frequency-Shift Keying). За счет очень коротких и крайне медленных сообщений достигается большой радиус действия мобильных устройств (десятки километров) при минимальной потребляемой мощности (10–20 мВт). Приоритет отдается передачам от мобильного устройства к БС (UL). Сеансы передач в обратном направлении (DL) применяются значительно реже.

Технология LoRa (Long Range) защищена двумя патентами (US7791415–2008 и EP2763321–2013), с 2012 г. и по настоящее время является проприетарной собственностью американской Semtech Corporation. Непосредственно технология LoRa определяет метод модуляции в разрешенном нелицензируемом диапазоне частот. Технология LoRa базируется на методе модуляции, запатентованном Semtech Corporation, в котором объединены способ расширения спектра с использованием линейной частотной модуляции (Chirp Spread Spectrum, CSS) и спектральная модуляция (Spread Spectrum Modulation, SSM).

На PHY устройства с поддержкой CSS регламентированы стандартом IEEE 802.15.4 для LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Networks). В зависимости от мощности сигнала и расстояния сети на базе технологии LoRa поддерживают скорости от 30 бит/с до 50 кбит/с в режиме ADR (Adaptive Data Rate). Устройства могут работать на расстояниях до 20 км при минимальном энергопотреблении, обеспечивающем несколько лет автономной работы на одном аккумуляторе типа AA. Максимальная длина пакета LoRa составляет 256 байт.

Основные технические характеристики технологий LPWAN нелицензируемого диапазона приведены в таблице.

Сети Wi-SUN предпочтительнее для относительно больших скоростей и больших объемов данных, критичных к правам доступа.

С технической точки зрения, технология LoRa предпочтительнее в том случае, когда необходима надежная симметричная связь в обоих направлениях (UL и DL). Технология Sigfox может обеспечить только асимметричный вид связи с большим приоритетом направления UL. Поэтому если нужно приложение, в котором используется алгоритм «управляющая команда оператора — ответ полевого мобильного устройства», то LoRa безусловно выигрывает по сравнению с Sigfox.

С другой стороны, Sigfox имеет преимущество для приложений, когда нужны эпизодические (один–два раза в сутки) короткие телеграммы данных от простейших датчиков (температуры, влажности, задымленности и т. д.). Однако следует учитывать, что Sigfox может обрабатывать не более 140 сообщений в сутки размером не более 12 бит. Кроме того,

Т а б л и ц а . Основные технические характеристики технологий LPWAN нелицензируемого диапазона

Технология	Максимальная скорость передачи данных	Топология	Мощность передатчика, мВт	Время задержки, с	Максимальная дальность действия, км
Wi-SUN	300 кбит/с	P2P, Mesh	20–1000	0,02	4
LoRa	50 кбит/с	Mesh, Star, P2P	25–100	1–2	20
Sigfox	300 бит/с	Star-Star	10–20	НД	30

мобильные устройства Sigfox имеют существенное ограничение по чувствительности, т. е. начинают устойчиво работать, только если полезный сигнал превышает уровень шумов примерно на 20 дБ. В то же время LoRa позволяет работать при сигнале ниже уровня шумов на 18 дБ.

Теоретическое преимущество технологии Sigfox заключается в том, что несколько систем можно разнести по частотам в одной геозоне. Однако на практике техническая реализация такого проекта потребует заметных капиталовложений и увеличения стоимости БС. В то же время следует отметить, что до трех сетей LoRa также можно разнести на разные частоты.

Одна из проблем БС Sigfox связана с тем, что они крайне чувствительны к точности установки частоты. Например, в таких системах с частотной полосой 100 Гц нестабильность работы стандартного кварцевого резонатора, имеющего погрешность 0,001%, может привести к тому, что рабочая частота конечного устройства уйдет далеко за пределы заданных значений. Поэтому БС в Sigfox-системах должна выделять очень узкий сигнал в широком спектре и быстро на него настроиться.

Огромное значение имеет бизнес-модель этих технологий. Полузакрытая система Sigfox заставляет операторов этих систем приобретать БС и лицензии у монополиста Sigfox Société Anonyme. Технологи Sigfox и Wi-SUN не ограничивают принципы конструирования базовых чипов. Преимуществом Wi-SUN с этой точки зрения является то, что альянс стимулирует совместную работу в сети изделий различных производителей.

Очевидно, что конкуренция в сфере мобильных устройств будет определяться спросом, который, в свою очередь, зависит от совокупной цены услуги и наличия оператора в данном регионе. Насколько можно понять из дискуссии в Интернете, наиболее крупные операторы сотовой связи отдадут предпочтение сетям LoRa и Wi-SUN. Как

отмечалось выше, в состав Wi-SUN Alliance входят ведущие мировые производители, например Cisco, Toshiba, Analog Devices, Itron, Omron, Murata, Renesas и др. Технологию LoRa поддерживают такие фирмы, входящие в LoRa Alliance, как IBM, ST, Semtech, ZTE, Gemalto, Microchip и др. Поэтому нетрудно предположить, что в технологии LoRa и Wi-SUN будет вложено значительно больше средств, чем в проекты Sigfox. Следует учитывать тот факт, что технология LoRa является проприетарной и принадлежит корпорации Semtech. Поскольку LoRa не является открытым стандартом, то для внедрения решений на базе LoRaWAN необходимо использование чипов либо непосредственно от Semtech, либо от их лицензиатов. Такая монополия может серьезно сказаться на перспективе развития этой технологии. В противоположность LoRa и Sigfox, над продвижением Wi-SUN работает более 130 ведущих производителей электроники.

Немаловажную роль играют провайдеры беспроводных сетей. В настоящее время наиболее развита инфраструктура LoRa. За ней следует Wi-SUN. Технология Sigfox получила развитие в основном во Франции. Наличие развитой экосистемы во многом будет способствовать развитию той или иной технологии.

Различие между сетями LPWAN нелицензируемого диапазона проявляется в поддерживаемой топологии. Сети Wi-SUN в основном работают с топологиями Mesh и P2P. Технология LoRa поддерживает различные топологии (Star, Mesh, P2P и др.). Менее универсальными являются сети Sigfox, которые используют либо топологию Star, либо комбинацию «звезда из звезд» (Star-Star). В условиях городской застройки и при наличии электромагнитных помех предпочтение, как правило, имеют сети с топологией Mesh, которые позволяют использовать несколько избыточных путей соединения. При этом значительно повышается надежность сети за счет возможности обхода «теневых зон» и поврежденных узлов. Кроме того, передача на небольшие расстояния

между узлами позволяет значительно снизить энергозатраты. Еще одним преимуществом ячеистой структуры сети является возможность масштабирования. В этом плане следует обратить внимание на самоорганизующиеся одноранговые сети Wi-SUN. В этих сетях при добавлении нового устройства автоматически возникают одноранговые узлы для связи, которые перенаправляют посылку в случае необходимости к ближайшим доступным аналогам.

При выборе сети следует обратить внимание на полосу пропускания, двунаправленность связи и временную задержку. Устройства LoRaWAN и Sigfox рассчитаны на небольшую пропускную способность и работу с небольшими объемами передаваемых данных при выходе в эфир несколько раз в день. В тех случаях, когда необходима быстрая реакция сети на команду центрального сервера, преимущество имеют Wi-SUN, в которых типовое значение времени задержки минимально и составляет 0,02 с [27].

Безопасность является основной проблемой для любых сетей, критичных к несанкционированному доступу, таким, например, как системы охраны и безопасности. Из рассматриваемых LPWAN нелицензируемого диапазона наибольший уровень безопасности, соответствующий некоторым военным стандартам США, имеют только Wi-SUN [27]. В них использованы такие атрибуты безопасности, как, например, аутентификация по сертификатам стандарта x.509, защита сетей в соответствии со стандартом IEEE 802.11i, поддержка расширенного стандарта шифрования AES. Однако следует отметить, что для многих приложений IoT такой уровень защиты является избыточным.

В контексте энергопотребления выбор технологии определяется тем, насколько необходимо автономное питание от батареи и как долго устройство должно работать без смены батареи. Два крайних случая помогают понять эту проблему. Например, датчики перемещения контейнеров должны работать без замены батареи несколько лет. Технологии Sigfox и LoRa для таких приложений предлагают вариант, когда в течение дня отправляется одно сообщение, и модуль может работать от одной батареи CR2032 в течение примерно десяти лет.

В то же время в сетях с быстрой реакцией (например, охранные и пожарные сигнализации) допускается использование внешнего питания и режим повышенного расхода для передачи видеоклипов в момент тревоги. Для этих целей, вероятно, больше подходят Wi-SUN. То же самое можно сказать и о сетях промышленной автоматизации и системах управления городским транспортом.

Инфраструктура — это наиболее актуальный вопрос для будущего развития IoT-сетей. В общем случае инфраструктура включает в себя: производителей чипов, модулей, антенн и вспомогательного оборудования; операционные системы, поддерживающие функционирование устройств в сети, провайдеров сетей и услуг; системы технической поддержки и обслуживания и т. д.

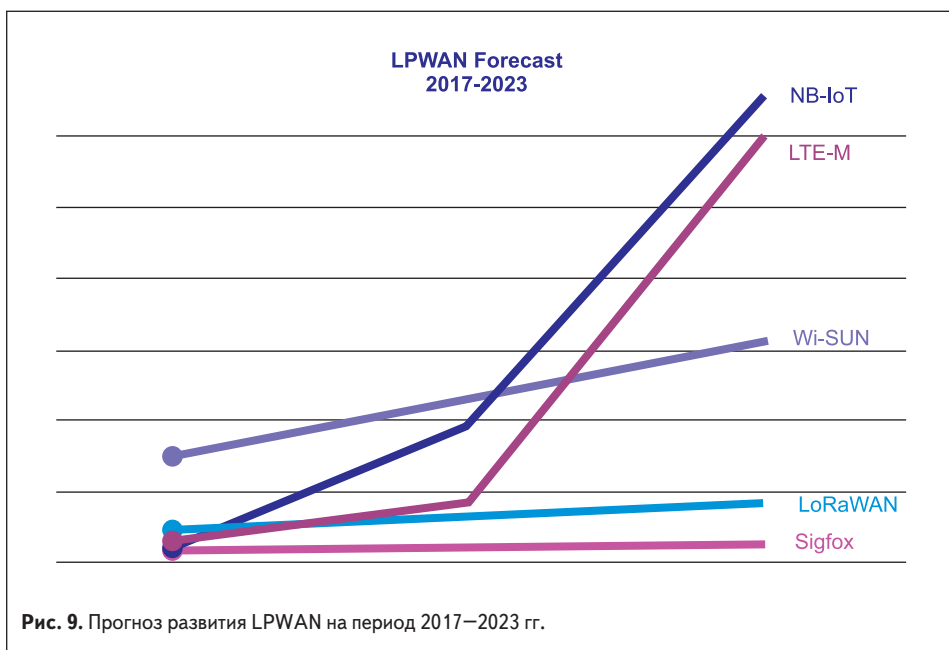


Рис. 9. Прогноз развития LPWAN на период 2017–2023 гг.

Современные технологии SDR позволяют создавать универсальные чипы, поддерживающие одновременно PHY- и MAC-уровни различных технологий. Наиболее вероятно развитие линейки универсальных чипов, основанных на базовом стандарте 802.15.4, — таких, например, как TI CC1350. Сложнее обстоит дело с MAC-уровнем и стеками протоколов верхних уровней. Здесь пока нет универсального решения, соответственно, нет и единой экосистемы, в которой могли бы совместно функционировать все (или большинство) из существующих технологий LPWAN.

Согласно прогнозу развития беспроводных сетей для проектов IoT, «Умный дом» и «Умный город» [8], устройства и сети с поддержкой Wi-SUN на период 2017–2023 г. будут развиваться значительно быстрее по сравнению с другими LPWAN-технологиями нелицензируемого диапазона (рис. 9).

В заключение отметим, что конкурентная борьба в области IoT значительно обострилась с публикацией стандарта 3GPP Rel. 13 для мобильных устройств EC-GSM-IoT, LTE-MTC и NB-IoT. Эти технологии дают возможность развертывать сети IoT на базе существующих сетей 2G/3G/4G и обслуживать десятки тысяч мобильных устройств IoT в зоне действия одной БС без ущерба для современных

многофункциональных гаджетов, смартфонов и планшетов. ■

Литература

1. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27634557>
2. www.elcomdesign.ru/magazine/archive/magazine_147.html
3. www.wi-sun.org
4. www.wi-sun.org/index.php/resources/presentations/2016-12-delhi/41-wi-sun-alliance-introduction-r2-pdf/file
5. https://echonet.jp/about_en
6. https://echonet.jp/product_en/echonet_lite_specification/
7. www.wi-sun.org/images/assets/docs/20131016-wi-sun-introduction-euw-0v01.pdf
8. <http://rethinkresearch.biz/reports/lpwan-market-forecast-2017-2023>
9. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4v-2017.html>
10. <http://electronics360.globalspec.com/article/5943/wi-sun-alliance-adds-long-range-mesh-to-wireless-iot-fray>
11. www.w3.org/2013/07/mmi/slides/Umejima.pdf
12. www.ietf.org/proceedings/96/slides/slides-96-lpwan-8.pdf
13. www.wi-sun.org/index.php/resources/presentations/2016-12-delhi/58-wi-sun-physical-layer-overview-india-open-house/file
14. <http://processors.wiki.ti.com/index.php/Contiki-6LOWPAN>
15. <https://tools.ietf.org/html/rfc6550>
16. <http://investors.itron.com/releasedetail.cfm?releaseid=1009571>
17. www.silverspringnet.com/video/interview-silver-springs-raj-vaswani/
18. <https://blogs.cisco.com/news/cisco-smart-grid-team-supports-wi-sun-alliance-to-drive-interoperability>
19. www.nict.go.jp/en/press/2015/02/13-1.html
20. www.renesas.com/en-us/about/press-center/news/2015/news20151117.html
21. www.wi-sun.org/index.php/products/certified-products/item/3-echonet-route-b/91-toshiba-home-gateway-hem-gw26a-wsa0083
22. https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/company/news/news-topics/2014/04/topics_140425_e_1.html
23. www.globalsign.com
24. www.telec.or.jp/eng/services/testing/wisun.html
25. www.link-labs.com/sigfox-vs-lora/
26. www.lightreading.com/iot/telia-betting-on-nb-iot-over-lora-sigfox/d/d-id/728497
27. www.bresslergroup.com/blog/m2m-communication-sigfox-lora-lte-m/
28. www.wi-sun.org/images/assets/docs/Wi-SUN-Alliance-comparing_IoT_Networks-r1.pdf