

Vladislav Viktorovich Sheshalevich
LLC "Innolabs, Skolkovo, Technopark, 2nd floor, off. 317, Moscow, Russia
e-mail:vladislav@lpwa.ru, ORCID 0000-0003-3680-0125

LPWAN – Low-power Wide-area Network. Communication for the Internet of Things.

Keywords: Internet of Things (IoT), LPWAN, M2M- industry

Summary. Recent advances in the field of cheaper sensors and various devices to control the parameters of industrial and household equipment has led to the emergence of new communication technologies, the so-called Internet of things, "machine-to-machine" or M2M technologies. The main feature of these technologies is a network communication of the physical objects without direct human intervention. The specifics of using the Low-power Wide-area Network (LPWAN network) for these new communication technologies are considered. The LPWAN technologies have significant prospects for development adding to already traditional technologies such as Wi-Fi and cellular. This very term describes an approach, the communication technologies, characterized by the principles of reducing the connection speed in order to achieve wider range and lower power consumption of end nodes. Based on this concept different companies have built the specific competing systems of communication, such as Sigfox (first LPWAN technology), LoRa (derived from Long Range) Ingenu RPMA, Weightless-P, "Strizh" telematics (the Russian analog of Sigfox) and others. Each of the systems applies different methods to increase the range of coverage, to lower energy consumption and to use different possibilities for scalability. The principles of functioning of these communication systems are analyzed below. The major attention is paid to describing the very popular LPWAN-technology LoRa as one of the most open technology for practical applications. It is based on the same name radio modulation using its own unique method to broaden a spectrum. The topology and the main components of this network, including the sensor (end device) with a radio module, the LoRa gateway and its network architecture are described in detail. Examples are given of the LoRa systems emerging on the domestic market of the Internet of things.

Владислав Викторович Шешалевич
ООО «ИнноЛабс», Москва, Сколково, Технопарк, 2й этаж, оф.317
e-mail:vladislav@lpwa.ru, ORCID 0000-0003-3680-0125

LPWAN – НИЗКОПОТРЕБЛЯЮЩИЕ СЕТИ БОЛЬШОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ. СВЯЗЬ ДЛЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.

Ключевые слова: Интернет вещей, LPWAN, M2M-индустрия

Аннотация. Последние достижения в области удешевления датчиков и различных устройств контроля параметров промышленного и бытового оборудования привело к появлению новых коммуникационных технологий, получивших название Интернет вещей, «machine-to-machine» или M2M-технологии, основной особенностью которых является сетевое взаимодействие материальных объектов без явного непосредственного присутствия пользователей. В данной работе рассмотрены особенности применения в этих новых коммуникационных технологиях низкопотребляющих сетей большого радиуса действия (LPWAN – сетей), имеющих значительные перспективы развития и дополнения к уже ставшим традиционными технологиям типа Wi-Fi и сотовой связи. Это название описывает подход, концепцию технологий связи, объединенных принципами снижения скорости соединения для достижения большего радиуса действия при низком энергопотреблении конечных узлов. На этой концепции разными компаниями уже строятся конкретные конкурирующие системы связи, например Sigfox (первая LPWAN технология), LoRa (производная от словосочетания Long Range), Ingenu RPMA, Weightless-P, Стриж телематика (российский аналог Sigfox) и другие, каждая из которых

применяет различные методы для увеличения диапазона покрытия, использования малых энергозатрат и возможностей технической масштабируемости. Проведен анализ принципов действия указанных систем связи. Основное внимание в работе уделено описанию очень популярной LPWAN-технологии LoRa, как наиболее открытой технологии для практического применения. В её основе лежит одноименная радиомодуляция, использующая собственный метод расширения спектра. Подробно описаны топология и основные компоненты данной сети, включая сенсор (конечное устройство) с радиомодулем, гейтвей LoRa и архитектура сети. Приведены примеры выхода системы связи LoRa на отечественный рынок Интернета вещей.

Введение

Такие новые IT-технологии как Интернет вещей (ИВ) или «machine-to-machine» (M2M-технологии) способны произвести настоящую революцию в нашем привычном жизненном укладе, в профессиональной деятельности [1-3] и помочь в преодолении глобальных изменений, которые происходят в результате демографического «взрыва», энергетического кризиса, истощения ресурсов Земли и загрязнения окружающей среды. Для практической реализации этой тенденции, «вещи» должны получить возможность обмена информацией между собой, а также с пользователями для того, чтобы обеспечить интеллектуализацию процессов принятия решений и их положительное влияние, в частности, на всю экосистему.

Множество независимых исследований прогнозируют бурное развитие и прирост выручки от ИВ и от M2M-индустрии в ближайшие десять лет. Так ожидается, что к 2020 году количество подключенных устройств и бытовой электроники к системам M2M превысит количество пользователей мобильных телефонов, персональных компьютеров, ноутбуков и планшетов. К 2024 году промышленность ИВ, как ожидается, будет генерировать доход в размере 4,3 триллионов долларов, охватывая различные секторы, к примеру: производство различных устройств контроля, сферу связи, и другие дополнительные услуги [4-7].

Последние достижения в области удешевления датчиков и устройств, наряду с появлением новых коммуникационных технологий, являются положительными показателями прогнозируемых тенденций.

В связи с этим представляется актуальным вопрос анализа особенностей так называемых LPWAN-сетей, задающих оригинальную парадигму коммуникаций, которая дополнит сотовую связь и технологии беспроводной связи малого радиуса действия для различных приложений ИВ. Ожидается, что их рынок будет огромным: примерно 1/4 часть от 30 млрд. устройств ИВ будут подключены к Интернету с использованием сетей LPWAN, используя либо частные технологии, либо технологии сотовой LPWAN-связи [5].

Технологии связи

Различные виды современной беспроводной связи представлены на рисунке 1.

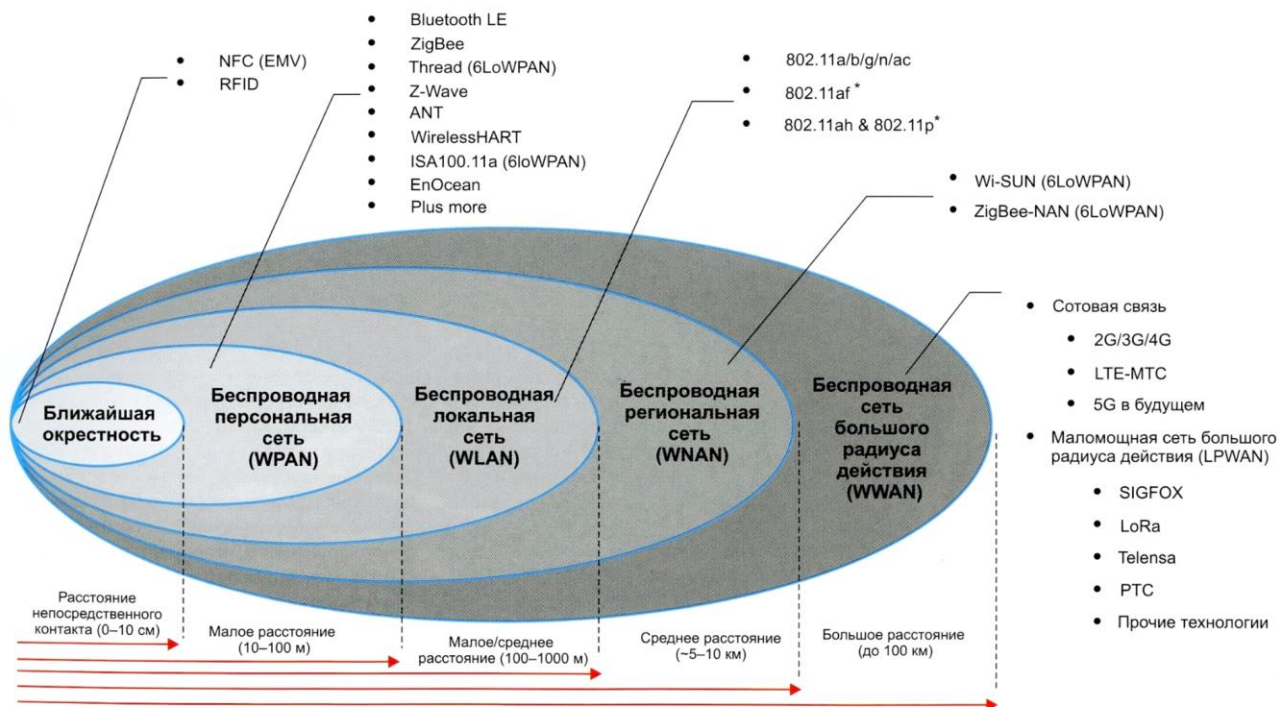


Рисунок 1 Технологии беспроводной связи

Наиболее популярные в наши дни для передачи данных с различных устройств виды связи можно разделить на две основные категории. Первая - связь малого радиуса действия, к ней относятся такие технологии, как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee. Вторая - связь большого радиуса действия, где «правят бал» сети сотовой связи GSM 2G, 3G, 4G. Анализ тенденций развития сотовых сетей показывает, что они постоянно движутся в сторону увеличения объема передаваемой информации. Рост передаваемого трафика и требований пользователей приводят не только к тому, что каждое новое поколение сети предоставляет расширенные возможности групповой и видеосвязи, мобильных приложений, но и связаны с уменьшением зоны покрытия одной базовой станцией. Если в GSM можно было говорить о радиусе соты до 5 км в городе, то в 4G сетях речь идет о расстояниях меньше километра. В следующем поколении сетей 5G радиус покрытия сотой будет составлять всего несколько сотен метров. Кроме того, дорогие и сложные в технической реализации устройства сотовой связи вынуждены работать с различными видами волн для передачи голоса, текста и высокоскоростной передачи данных, что отрицательно влияет на срок жизни устройств питания и их стоимость.

Около 5 лет назад пользователи Европы обратили внимание на то, что развитие сотовых сетей идет в разрез с требованиями беспроводной связи для большинства датчиков, телеметрии, и того, что зовется Интернетом Вещей. Ведь огромному числу этих устройств не нужны высокие скорости и большие объемы передачи данных, им достаточно лишь иногда сообщать о своем статусе и небольших изменениях. Для устройств контроля малой мощности явно прослеживается потребность в уменьшении сложности их технической составляющей с целью сокращения стоимости.

Например, датчик открытия двери в устройствах охранной сигнализации почти весь срок своей жизни «спит», активизируясь лишь при срабатывании и в этом случае ему нужно отправить пакет всего в несколько байт. И таких устройств великое множество — от приборов учета в ЖКХ (электросчетчики, водосчетчики, и т.д.) до управляемых уличных фонарей, контролируемых парковочных мест, датчиков присутствия и т. п. Вне городских территорий подобных применений оказывается еще больше: точное земледелие, мониторинг транспорта, безопасность газопроводов, мониторинг вырубки леса и дикой природы и многое другое.

	Характеристики систем связи	Система сотовой связи	IoT Интернет Вещей
1	Мощность передатчиков	Базовые станции – до 40Wt Абонентские станции – до 2Wt	Шлюз – 200 mWt Устройство – 25 mWt
2	Дальность связи: - плотная городская застройка - сельская местность	Мобильная станция – базовая станция 0,2 – 0,5 км 3 – 5 км	Устройство – шлюз 2 – 5 км 20 – 30 км
3	Время работы до подзарядки (замены) аккумулятора	1 - 3 дня	До 10 лет
4	Использование SIM	Да	Нет
5	Handover	Обязательное условие работы сотовой сети	Нет
6	Требование по местоположению мобильной станции или устройств IoT	Обязательное местоположение мобильной станции с точностью до соты	Нет
7	Общее количество активных устройств на базовую станцию / шлюз	100-200	20000 - 60000

Рисунок 2 Сравнение систем сотовой связи и LPWAN

Для контрольных устройств важно также долгое время работы без обслуживания, максимально привлекательная стоимость и минимальные затраты на инфраструктуру. Это послужило предпосылкой для активного создания технологий связи, получивших название LPWAN (Low Power Wide Area Network) — малопотребляющие сети большого радиуса действия.

Под этим названием понимается подход, концепция технологий связи, объединенных принципами снижения скорости соединения для достижения большего радиуса действия при низком энергопотреблении конечных узлов. На этой концепции разными производителями уже строятся конкретные конкурирующие системы, например Sigfox (первая LPWAN технология), LoRa (производная от словосочетания Long Range, наиболее открытая технология для использования), Ingenu RPMA, Weightless-P, Стриж телематика (русский аналог Sigfox) и другие. Каждая из них применяет различные методы для увеличения диапазона покрытия, использования малых энергозатрат и возможностей технической масштабируемости.

Особенности LPWAN

У всех указанных систем LPWAN-связи много общего.

1. Необходимость иметь дешевые конечные модули приводит к максимальному упрощению топологии сети. В большинстве случаев это «звезда», когда в центре устанавливается гейтвей (базовая станция), вокруг которого на большой территории распределены датчики.

2. В отличие от работы в mesh (ячеистой топологии), контрольные устройства не должны тратить впустую энергию для прослушивания других устройств, передающих свой трафик через них. 3. Базовая станция, которая находится в постоянно активном режиме, обеспечивает простой и быстрый доступ конечным устройствам.

Датчики выходят на связь по необходимости, а в другое время находятся в режиме «сна». При этом, как правило, отсутствует механизм согласования сеансов связи и радиочастота выбирается конечным узлом из доступного диапазона случайным образом (используются протоколы MAC уровня ALOHA с произвольным доступом, в котором конечные устройства передают информацию без протокола канального уровня). Простота

ALOHA протокола способствует экономии энергии конечных устройств с батарейным питанием. При этом преимущественно связь идет по направлению от конечных узлов на гейтвей, а обратная связь ограничена.

Стоит отметить, что технологии LPWAN обеспечивают значительную зону покрытия и малое потребление энергии за счет низкой скорости передачи данных (как правило, при передаче до десятков килобит в секунду) и при наличии задержки передачи сигнала (в секундах или минутах). Эти технологии не подходят для работы устройств с высокой пропускной способностью, требующих сверхмалой задержки, например, для оборудования беспроводного управления производственными процессами (АСУ ТП). Однако существует множество областей применения данных технологий, которые предусматривают небольшой объем передачи данных с нефиксированными интервалами передачи, например: разработки для «умных домов и городов», приложения для измерения данных, носимой электроники, для сфер логистики, мониторинга среды и т.д.

Одно из важнейших достижений этих технологий — в высокой чувствительности радиомодулей. По сравнению с GSM связью она на 20 дБ больше, и очень близка к теоретическому пределу чувствительности радио. Сигнал работает ниже уровня шума в соотношении SNR до -10. Использование полосы частот ниже 1ГГц и специальных схем модуляции радиосигнала позволяет конечным устройствам подключаться к базовым станциям на расстоянии до десятков километров в зависимости от их местоположения (сельская / городская местность) [8,9].

Низкое энергопотребление. Типичным является срок работы устройств — до 10 лет на литиевой батарейке типоразмера АА при условии отправки 1го пакета с данными в час. Выбор 10-ти летней границы связан со сроком саморазряда литиевых батарей. Получается, что в таком режиме работы датчик не успеет разрядить батарейку быстрее, чем она сама разрядится. Если говорить про обычные щелочные батарейки (alkaline), их срок жизни 2-3 года.

Методы модуляции

Технологии LPWAN предназначены для бюджета канала связи в 150 ± 10 дБ, что позволяет расширить диапазон покрытия от нескольких километров в городской среде до десятков километров в сельских районах. На физическом уровне применение данной технологии обеспечивает высокое качество передачи данных с одновременным контролем уровня модуляции для того, чтобы хватало мощностей для передачи каждого бита информации. Вследствие этого, принимающие устройства могут правильно расшифровать даже слабые сигналы. Для современных приемников LPWAN нормой чувствительности считается -130 дБм.

В различных системах LPWAN-связи приняты два основных метода модуляции: узкополосный метод и метод расширения спектра.

Узкополосные техники модуляции обеспечивают значительный бюджет канала связи, кодируя сообщения на низкой пропускной полосе (обычно меньше чем 25 кГц). Эти техники модуляции эффективно делят весь спектр между каналами, назначая каждому каналу свою, очень узкую полосу. Уровень шума в каждой узкой полосе минимален. Поэтому приемнику не требуется улучшать качество обработки сигналов для его расшифровки, что позволяет разрабатывать простой и недорогой дизайн для приемопередатчика. NB-IoT и Weightless-P являются примерами применения подобных узкополосных технологий [10].

Несколько технологий LPWAN предусматривают сжатие каждого сигнала в канале в сверхузкой полосе (UNB) с шириной всего 100 Гц (например, Sigfox или Стриж), уменьшая тем самым уровень шума и увеличивая число конечных устройств на каждой полосе. Однако эффективная скорость передачи данных для конечных устройств при этом также уменьшается. Поэтому необходимо предусматривать увеличение временного отрезка для включенного радио канала. Низкая скорость передачи данных, в сочетании с

требованиями спектра при разделении основных полос, может ограничивать максимальный объем нагрузки и частоту передачи пакетов данных, ограничив тем самым количество возможных бизнес-моделей.

Техники расширения спектра передают узкополосный сигнал по полосе с более широким диапазоном частот, но с теми же энергозатратами. Передача шумового сигнала труднее отследить наблюдателям со стороны. Такая передача лучше защищена от внешних помех и вмешательств. Однако в данном процессе требуется увеличение объема обработки сигналов для его расшифровки принимающими устройствами, так как часто сигнал приходит ниже уровня шума. Передача узкополосного сигнала по широкой полосе приводит к менее эффективному использованию спектра. Но эта проблема, как правило, преодолевается при помощи многократных ортогональных последовательностей. Пока разнообразные сигналы используют различные ортогональные последовательности или возможности расширения спектра, все они могут быть расшифрованы одновременно, что приводит к более высокой пропускной способности сети. Существующие стандарты используют различные типы расширения спектра. Расширение спектра методом прямой последовательности - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) - и методом линейной частотной модуляции - Chirp Spread Spectrum (CSS) - используются технологиями Ingenu RPMA и LoRa соответственно.

Принцип работы LoRa

Остановимся подробнее на рассмотрении наиболее популярной LPWAN технологии LoRa. В её основе лежит одноименная радиомодуляция, использующая собственный метод расширения спектра. Данная технология была разработана и введена в коммерческую эксплуатацию корпорацией Semtech (Швейцария). Двухнаправленная связь обеспечивается специальным методом расширения спектра (CSS), который передает узкополосный сигнал по каналу с более широкой полосой. В результате сигнал очень сложно обнаружить извне, он защищен от внешних помех и шумов. В отличие от многих других LPWAN технологий, за счет более широких каналов передачи (125-500 кГц на канал) обеспечивается более высокая скорость соединения. Кроме того, решается вопрос обратной связи на дешевой компонентной базе, что вызывает затруднения у конкурирующих технологий на узкой и сверхузкой (UNB) полосах пропускания.

Передатчик может менять частоты при передаче сигнала без смены фаз между передаваемыми символами. Так как смена частоты происходит без увеличения энергетических затрат, приемник, находящийся на значительном расстоянии, может расшифровывать приглушенный, в несколько дБ сигнал.

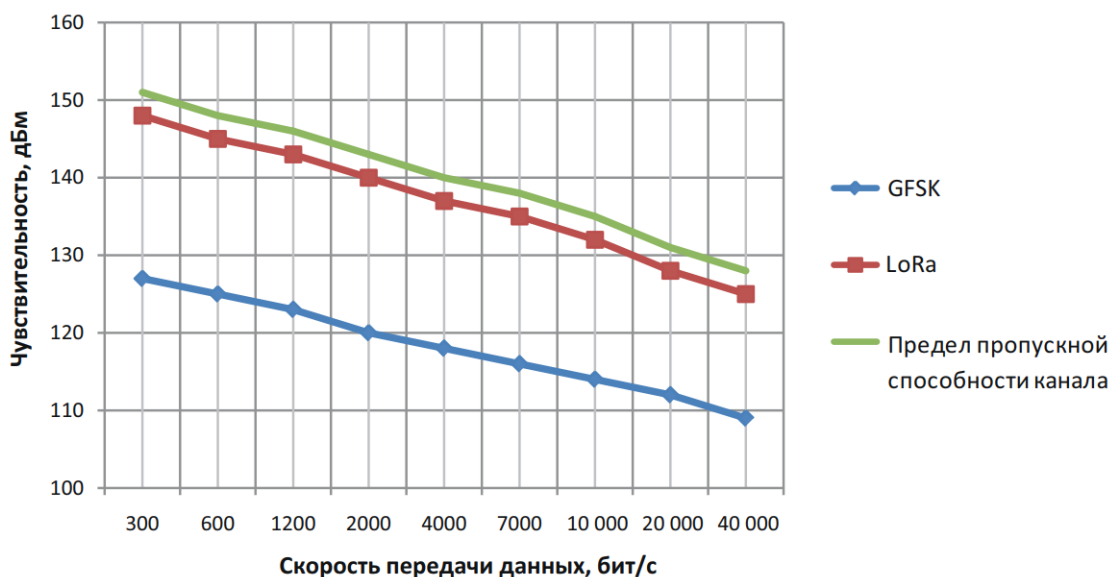


Рисунок 3 Чувствительность LoRa vs GSM

LoRa поддерживает многократный коэффициент расширения спектра SF (от 7-12) для нахождения оптимального соотношения между скоростью передачи данных и дальностью связи. Более высокий коэффициент предусматривает большую дальность за счет более низких скоростей передачи данных и наоборот. LoRa также комбинирует помехоустойчивое кодирование - Forward Error Correction (FEC) - с методом расширения спектра для увеличения чувствительности приемника. Скорость передачи данных колеблется от 300 бит/с до 11 кбит/с в зависимости от коэффициента расширения спектра и ширины канала. К тому же, базовая станция LoRa может одновременно получать множество сигналов при использовании различных коэффициентов расширения SF. Поэтому надо отметить, что коэффициент расширения спектра является третьим фактором, наравне с временем и частотой для вариативного использования технологии.

Сообщения, исходящие от конечных устройств, получает не одна, а все базовые станции в зоне действия, что предусматривает топология «звезда звезд» (рисунок 4). Используя различные радио параметры на сенсорах для отправки и приема сообщений, LoRa значительно увеличивает процент успешно полученных сообщений.

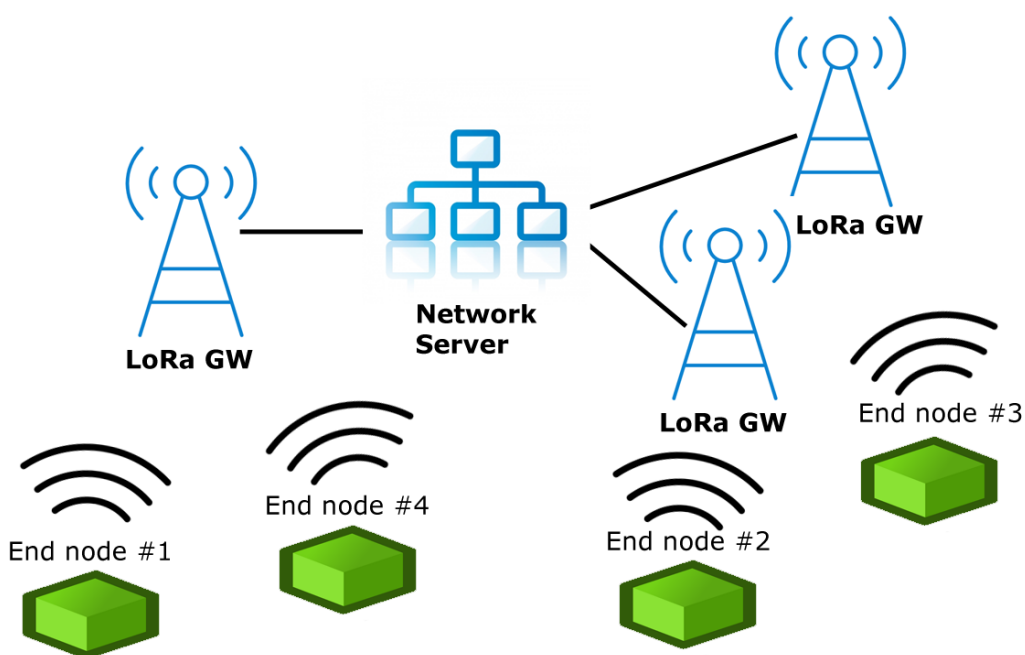


Рисунок 4 Топология сети

Дубликаты данных, полученных несколькими гейтвеями, отфильтровываются на уровне сервера.

Также в LoRa предусмотрен механизм определения местоположения датчиков при получении сообщения многими гейтвеями. С этой целью используется механизм «разница во времени прибытия сообщения» (TDOA), за счет точной синхронизации времени на гейтвеях.

Популярность данной технологии обусловлена тем, что в интересах увеличения продаж числа радиочипов, компания Semtech открыла полностью исходные коды для конечных устройств, базовых станций, а также референсный вариант сетевого сервера. В LoRa Alliance (организация, созданная для стандартизации единого сетевого протокола на технологии LoRa), входит на сегодняшний день порядка 400 компаний.

Компоненты LoRa-сети

Для работы LoRa-сети необходимо 3 составляющие:

1. Сенсор (конечное устройство) с радиомодулем, представленный на рисунке 5.

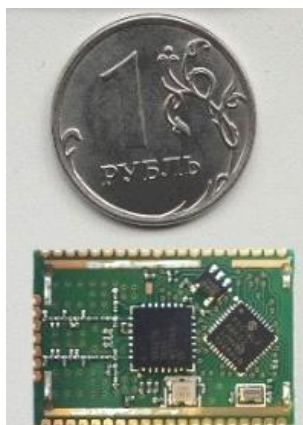


Рисунок 1 Сенсор LoRa

Его параметры

- бюджет канала связи – 168дБ;
 - низкое энергопотребление - 29мА в режиме передачи и 200мкА в спящем режиме;
 - время на передачу 1-го сообщения – от 110мс до 2.3сек (зависит от расстояния);
 - работа до 10 лет от батарейки АА;
 - рабочие частоты в нелицензируемом диапазоне: 433, 868 МГц;
 - минимальная стоимость готового передатчика – \$10;
2. Гейтвей LoRa (рисунок 6) с параметрами:



- Радио часть,
мощность передатчика (100 mW)

- Система на чипе (SoC)

Рисунок 6 Гейтвей LoRa

- чувствительность до -142,5 дБм;
 - возможность работы с отрицательным отношением сигнал/шум (до -9 дБ);
 - динамическая адаптация канала под различные скорости передачи;
 - 1 гейтвей обслуживает до 20000 передатчиков;
 - минимальная стоимость гейтвея — 300\$.
3. Сетевой сервер.

Авторизация и расшифровка пакетов данных происходит на сервере, обмен сообщения с датчиками зашифрован (end-to-end) типом шифрования AES-128.

Сетевой сервер может быть развернут как локально, так и в облаке (рисунок 7).

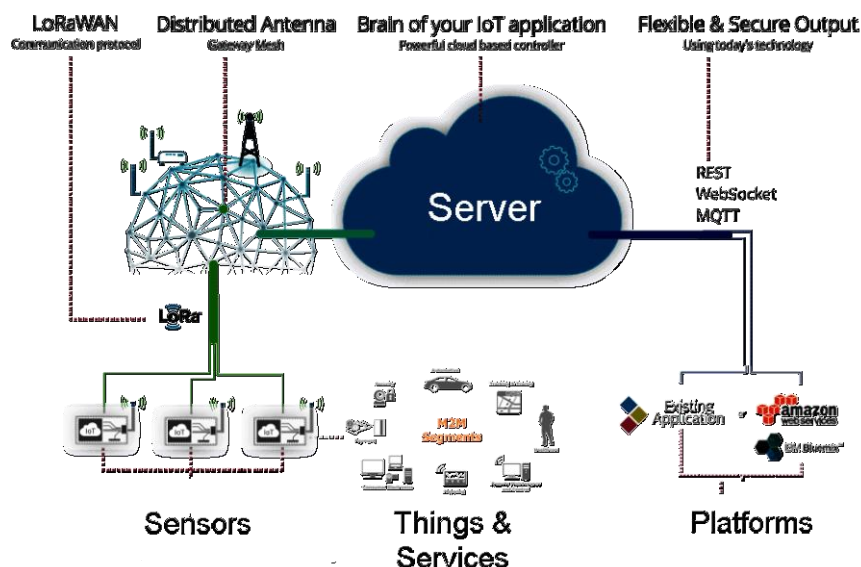


Рисунок 7 Архитектура сети LoRa

На рисунке видно, что после того, как данные с датчиков поступили на сервер, они передаются дальше в пользовательские приложения и платформы для аналитики и принятия решений.

Заключение

В России применение технологии LoRa стало особенно заметно в последние 2 года[11], когда на рынок стали выходить компании, строящие свои сети и предоставляющие услуги на этой технологии. В первую очередь это компании, предоставляющие услуги для ЖКХ по удаленному сбору показаний с приборов учета (МОЭСК, ЛОЭСК), а также реализующие проекты в нефтегазовой (ТрансгазМосква), транспортной (РЖД) и логистической сфере. В рамках Ассоциации Интернета Вещей создана и активно действует рабочая группа по технологии LoRa. Основные участники рынка в России: Иннолабс (www.lpwa.ru), Лэйс (www.lace.io), Сеть868 (www.net868.ru), Лартех (www.lar.tech).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Коновалова С.В., Миронов А.Н. Аспекты информационной безопасности интернета вещей // ИТ-Стандарт. 2016. Т. 1. № 4 (9). С. 49-51.
- 2 Зайцев Д.К., Киселёва Т.В. Актуальные проблемы интернета вещей // В сборнике: Студенческая наука для развития информационного общества Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 285-286.
- 3 Смыслов А.П. Взгляд в будущее: развитие технологий интернета вещей // В сборнике: Проект для России Сборник статей участников VII Международного научного студенческого конгресса: электронный ресурс. Научный руководитель: В.И. Бариленко, Ответственные редакторы: О.В. Карамова, А.П. Бувечич. 2016. С. 1410-1411.
- 4 Данилов К.Н., Кулик В.А., Киричек Р.В. Исследование методов идентификации и аутентификации устройств интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 3. С. 49-57.
- 5 Алексеев В. Технологии «Интернета вещей» для сетей ISM нелицензируемого диапазона частот // Беспроводные технологии. 2017. Т. 1. № 46. С. 44-50.
- 6 Тихвинский В., Коваль В., Бочечка Г. Перспективы стандартизации интернета вещей в международных организациях связи // Первая миля. 2017. № 2 (63). С. 26-32.

- 7 Дубков И.С., Сташевский П.С., Яковина И.Н. Решение практических задач на базе технологии интернета вещей. Новосибирск, 2017.
- 8 Татарникова Т.М., Елизаров М.А. Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети интернета вещей// Информационно-управляющие системы. 2017. № 2 (87). С. 44-50.
- 9 Кулаков Н.С. Беспроводные сети для интернета вещей// В сборнике: Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского Материалы конференции . 2017. С. 170-171.
- 10 Кумаритова Д. Л., Киричек Р. В. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 4. С. 33–48.
- 11 Жолудева А.В., Игнатовский А.М., Ржанных О.Е. Анализ развития интернета вещей в россии и мире // В сборнике: Сборник статей международных научных конференций сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско- преподавательского состава по результатам научных конференции. 2016. С. 146-149.

REFERENCES:

- 1 Konovalova S.V., Mironov A.N. Aspekty informacionnoj bezopasnosti interneta veshchej // IT-Standart. 2016. Т. 1. № 4 (9). S. 49-51.
- 2 Zajcev D.K., Kiselyova T.V. Aktual'nye problemy interneta veshchej // V sbornike: Studencheskaya nauka dlya razvitiya informacionnogo obshchestva Sbornik materialov V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. 2016. S. 285-286.
- 3 Smyslov A.P. Vzgljad v budushchee: razvitie tekhnologij interneta veshchej // V sbornike: Proekt dlya Rossii Sbornik statej uchastnikov VII Mezhdunarodnogo nauchnogo studencheskogo kongressa: ehlektronnyj resurs. Nauchnyj rukovoditel': V.I. Barilenko, Otvetstvennye redaktory: O.V. Karamova, A.P. Buevich. 2016. S. 1410-1411.
- 4 Danilov K.N., Kulik V.A., Kirichek R.V. Issledovanie metodov identifikacii i autentifikacii ustrojstv interneta veshchej // Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2016. Т. 4. № 3. S. 49-57.
- 5 Alekseev V. Tekhnologii «Interneta veshchej» dlya setej ISM nelicenziruемого diapazona chastot // Besprovodnye tekhnologii. 2017. Т. 1. № 46. S. 44-50.
- 6 Tihvinskij V., Koval' V., Bochechka G. Perspektivy standartizacii interneta veshchej v mezhdunarodnyh organizacijah svyazi // Pervaya milya. 2017. № 2 (63). S. 26-32.
- 7 Dubkov I.S., Stashevskij P.S., YАkovina I.N. Reshenie prakticheskikh zadach na baze tekhnologii interneta veshchej. Novosibirsk, 2017.
- 8 Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. Model' ocenki vremennyh harakteristik pri vzaimodejstvii v seti interneta veshchej// Informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2017. № 2 (87). S. 44-50.
- 9 Kulakov N.S. Besprovodnye seti dlya interneta veshchej// V sbornike: Mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh specialistov im. E.V. Armenskogo Materialy konferencii . 2017. S. 170-171.
- 10 Kumaritova D. L., Kirichek R. V. Obzor i sravnitel'nyj analiz tekhnologij LPWAN setej // Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2016. Том 4. № 4. С. 33–48.
- 11 ZHoludeva A.V., Ignatovskij A.M., Rzhanyh O.E. Analiz razvitiya interneta veshchej v rossii i mire // V sbornike: Sbornik statej mezhdunarodnyh nauchnyh konferencij sbornik dokladov studentov, aspirantov i professorsko- prepodavatel'skogo sostava po rezul'tatam nauchnyh konferencii. 2016. S. 146-149.