

Технология LoRa компании Semtech:

новый импульс развития «Интернета вещей»

В течение многих лет огромный потенциал «Интернета вещей» не был полностью раскрыт из-за влияния таких технических факторов, как ограниченный срок службы аккумуляторов оконечных устройств сети, необходимость использования дополнительных ретрансляторов для обеспечения надежной связи, особенно в условиях городской застройки, высокие материальные затраты и недостаток необходимых стандартов. Разработка протокола сети LoRaWAN и создание альянса LoRa, занимающегося его поддержкой и развитием, способствовали решению ряда проблем, ограничивающих широкое распространение «Интернета вещей». В данной статье рассматриваются особенности технологии LoRa, позволяющей добиться рекордных показателей дальности в сетях беспроводных датчиков, и особое внимание уделяется аппаратной реализации, в частности обзору ключевых характеристик трансиверов Semtech.

Константин Верхулевский
info@icquest.ru

Введение

Существует множество определений термина «Интернет вещей» (Internet of Things, IoT). В наиболее общем случае под этим понятием подразумевается единая сеть физических объектов, имеющих доступ в Глобальную сеть и использующих встроенную технологию для измерения собственных характеристик или параметров внешней среды, анализа собираемых данных и передачи полученной информации на другие устройства. По прогнозам многих исследовательских компаний, например Forrester Research, к 2020 году число подключенных к «Интернету вещей» устройств достигнет 22 млрд штук, при этом 60% из них будут относиться к маломощным устройствам, работающим в сетях WAN (Wide Area Network). Возникает вопрос: как обеспечить надежное объединение этих устройств в сети с возможностью масштабирования без сопутствующего двух- или трехкратного увеличения количества базовых станций GSM-сетей и/или значительного увеличения числа точек доступа? Очевидный ответ: внедрить устойчивые сети связи на основе узлов с увеличенным радиусом действия и максимальным временем автономной работы, позволяющие полностью отказаться от применения ретрансляторов.

23 марта 2015 года Semtech Corporation и исследовательский центр IBM Research объявили о важном достижении в области беспроводных технологий передачи данных, представив новый открытый энергоэффективный сетевой протокол

LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks), обеспечивающий значительные преимущества перед Wi-Fi и сотовыми сетями благодаря возможности развертывания межмашинных (M2M) коммуникаций. Появившаяся технология вызвала неподдельный интерес на рынке беспроводной связи. Для ее поддержки, развития и стандартизации был создан альянс LoRa (LoRa Alliance), который в настоящее время стремительно развивается, о чем говорит постоянное увеличение количества зарегистрированных членов. В состав альянса входят как известные производители электроники (Cisco, IBM, Kerlink, IMST, Semtech, Microchip Technology), так и ведущие телекоммуникационные операторы (Воуугес Telecom, KPN, SingTel, Proximus, Swisscom).

Основная задача LoRa Alliance — объединение аппаратного и программного обеспечения на базе стандарта LoRaWAN, чтобы обеспечить возможность операторам связи предоставлять услуги «Интернета вещей» как коммерческим организациям, так и частным лицам. Активное использование стандарта позволит значительно упростить задачу соединения миллиардов устройств — от беспроводных датчиков в приложениях промышленной автоматизации и системах безопасности до бытовой электроники.

На основе нового протокола создано простое в использовании аппаратно-программное решение, включающее программный комплект разработки Mote Runner от IBM и однокристальные трансиверы Semtech на аппаратном

уровне, позволяющее создавать системы с возможностью беспроводной передачи данных на расстояния до 15 км (в зависимости от особенностей рельефа местности). Mote Runner — средство разработки инфраструктуры беспроводных сенсорных сетей — представляет собой открытую платформу для подключения датчиков и исполнительных механизмов к сети. Среда разработки IBM Mote Runner содержит все необходимые инструменты для проектирования приложений на высокоуровневых объектно-ориентированных языках, таких как Java и Си#, и предоставляет поддержку отладки и моделирования сети на уровне исходного кода. Для разработки приложений IBM также открыла исходный код протокола LoRaWAN, доступный вместе с примерами как на самом сайте компании, так и на популярном ресурсе github.com [1, 2].

Библиотека LMIC размером не более 20 кбайт написана на языке C, обеспечивает реализацию стандарта на MAC-уровне и содержит готовый код для микроконтроллеров малопотребляющей серии STM32L (ядро Cortex-M3), работающих в связке с приемопередатчиками компании Semtech семейства SX127x. Она адаптирована для компиляторов IAR, Keil и GCC, а использование при ее написании концепции HAL-драйверов облегчает процедуру портирования программ при переходе с одного микроконтроллера на другой. Также доступны электрические принципиальные схемы связки микроконтроллер-трансивер с необходимой обвязкой, позволяющие при желании использовать протестированные схемотехнические решения в своих разработках. В итоге, с учетом применения облачного сервера от IBM, можно получить доступное решение мониторинга своей сети распределенных датчиков без необходимости использования Wi-Fi-, GSM-, 3G- и WiMAX-устройств. Аппаратная реализация протокола LoRaWAN основана на применении запатентованного компанией Semtech метода модуляции LoRa, чьи конкурентные преимущества будут рассмотрены далее.

Ключевые особенности применения технологии LoRa

При разработке сетей беспроводных датчиков определяющее значение имеет максимальная дальность радиосвязи, позволяющая обойтись без дополнительных ретрансляторов сигнала, тем самым сокращая затраты и упрощая топологию. Основным параметром, характеризующим общую производительность системы в целом, является бюджет канала связи, который формируется из суммы чувствительности приемника и выходной мощности передатчика. Мощность лимитирована регламентирующими стандартами, поэтому очевидным путем улучшения дальности связи становится повышение чувствительности приемника [3]. Превосходная чувствительность (до -148 дБм) — ключевая характеристика LoRa-устройств компании Semtech, достигаемая благодаря применению одноименного метода модуляции (рис. 1). Этот способ модуляции предполагает использование технологии расширения спектра, при которой данные кодируются широкополосными ЛЧМ-

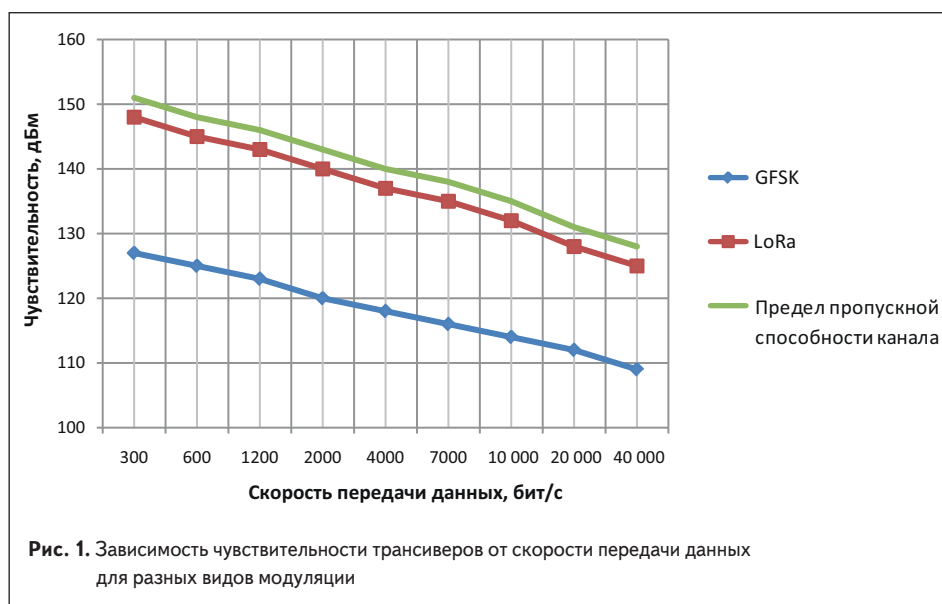


Рис. 1. Зависимость чувствительности трансиверов от скорости передачи данных для разных видов модуляции

импульсами с частотой, увеличивающейся или уменьшающейся на некотором временном интервале. В отличие от технологии прямого расширения спектра такое решение делает приемник устойчивым к отклонениям частоты от номинального значения и упрощает требования к тактовому генератору.

С учетом максимальной разрешенной выходной мощности отдельных трансиверов бюджет канала связи составляет 168 дБ, что позволяет организовать гарантированную линию связи на расстояниях до 15 км в сельской местности и до 5 км в условиях плотной городской застройке. Для сравнения: максимально возможная дальность передачи данных интеллектуальных приборов учета с использованием GFSK-модуляции составляет не более 1–2 км.

Следует также отметить, что технология расширения спектра совместно с применяемой упреждающей коррекцией ошибок, восстанавливающей искаженные биты данных, позволяет повысить отношение сигнал/шум и обеспечить работу в условиях импульсных помех. Например, при использовании коэффициента расширения $SF=12$ демодулятор LoRa может работать при соотношении сигнал/шум на входе радиоприемного тракта равным -20 дБ (табл. 1). Здесь отрицательные значения указывают на возможность принимать сигнал ниже уровня собственных шумов [4]. Коррекция ошибок требует внесения небольшой избыточности, связанной с дополнительным кодированием данных в передаваемом пакете.

LoRa-устройства стабильно функционируют в условиях воздействия сильных интерференционных помех от субгигагерцовых сигналов оборудования стандартов 4G/LTE. Так, уровень

Таблица 1. Отношение сигнал/шум для различных методов модуляции

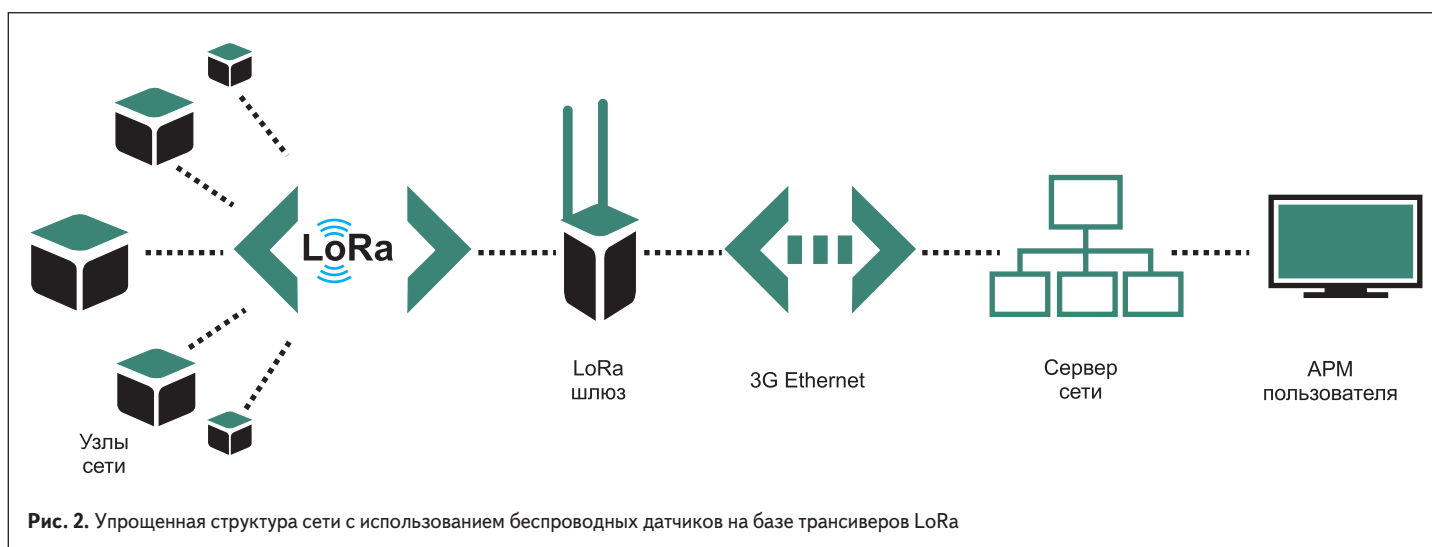
Тип модуляции	Отношение сигнал/шум, дБ
LoRa SF=12	-20
LoRa SF=10	-15
GMSK	9

подавления внутриволновых интерференционных помех у SX1272 на 25 дБ лучше по сравнению с компонентами с частотной манипуляцией. Еще одной отличительной чертой являются превосходные селективные возможности приемников. Типовые значения соответствующих показателей будут рассмотрены далее применительно к конкретным устройствам.

В системах автоматизации часто вынужденно приходится применять ячеистую топологию сети для организации надежного канала связи с узлами, удаленными от координатора. В этом случае разработчикам необходимо рассмотреть варианты питания, а также обеспечить маршрутизацию, автоматическое распознавание, самовосстановление и исключение отказа всей сети в результате выхода из строя одного узла, что является непростой задачей как на уровне протокола, так и на уровне «железа». Приемопередатчики LoRa со сверхдальним радиусом действия гарантируют простоту развертывания сети, поскольку ориентированы на использование топологии «звезда» — простейшей архитектуры с наименьшей задержкой, не требующей транзитной передачи данных через ретрансляторы (рис. 2). В звездообразной сети легко рассчитать длительность автономной работы каждого узла от батареи, что делает ее идеальной для применения в различных интеллектуальных приборах учета.

Предлагаемые компанией Semtech микросхемы трансиверов серии SX127x для конечных узлов имеют ультранизкое собственное энергопотребление от 9,7 мА в режиме приема и 200 нА в режиме ожидания со сверхбыстрым переходом в рабочий режим, поэтому они рекомендованы для устройств с батарейным питанием [5]. Адаптивный механизм выбора скорости передачи данных позволит увеличить срок службы батарей, улучшить емкость, пропускную способность и масштабируемость сети.

При масштабах развертываемой сети, исчисляемых сотнями и тысячами узлов, не менее важным фактором становится не только надежность соединения, но и стоимость готового решения. Низкая стоимость применения сетей LoRaWAN



обусловлена малой себестоимостью конечных узлов сети (микросхема серии SX127x и микроконтроллер STM32L стоят всего несколько долларов), отсутствием ретрансляторов, доступностью бесплатного протокола и использованием для радиосвязи нелицензированного ISM-диапазона частот, что является дополнительным фактором распространения систем на территории Российской Федерации. Напомним, что в России на основании решения Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) для указанных целей в диапазоне от 100 МГц до 10 ГГц выделены следующие каналы: 433,92 МГц $\pm 0,2\%$; 868 МГц $\pm 1,4\%$; 2,45 ГГц $\pm 2,0\%$; 5,8 ГГц $\pm 1,3\%$. Эти частоты могут использоваться без оформления соответствующего разрешения ГКРЧ при условии соблюдения требований по ширине полосы, излучаемой мощности и назначению готового изделия.

Обзор LoRa-трансиверов компании Semtech

В настоящее время семейство SX127x компании Semtech содержит шесть трансиверов, доступных для разработчиков беспроводных устройств широкого спектра применений. Первые приемопередатчики SX1272/3, используемые в качестве базовой модели популярный трансивер SX1232, были адаптированы под

рабочие частоты 868/915 МГц, а дальнейшее расширение серии осуществлялось за счет широкополосных микросхем SX1276/7/8/9 (табл. 2).

Характерной чертой всех устройств серии SX127x является универсальность их применения: внутренние регистры памяти позволяют динамически изменять рабочую частоту, ее девиацию, битрейт, вид модуляции, выходную мощность и многие другие параметры, а также устанавливать режимы работы всех периферийных блоков, что позволяет использовать один и тот же беспроводной модуль для решения разных задач. Для конфигурирования всех основных параметров радиочастотной и цифровой части микросхемы предусмотрен интерфейс связи SPI [6]. Все микросхемы соответствуют требованиям WMBus, IEEE 802.15.4g (SUN), FCC 15.247, ARIB T96/108, EN 300-220 и других регулирующих стандартов.

Помимо LoRa, приемопередатчики серии SX127x поддерживают следующие виды модуляции: FSK, GFSK, MSK, GMSK и OOK. При выборе необходимого метода нужно найти компромисс между пропускной способностью канала и требуемой дальностью связи. Трансиверы, использующие модуляцию LoRa, относятся к низкоскоростным

устройствам, их максимальная скорость обмена данными не превышает 37,5 кбит/с. В то же время для повышения пропускной способности до 300 кбит/с возможно применение традиционных способов, но, соответственно, мы лишаемся всех вышеописанных преимуществ LoRa. Рассмотрим взаимодействие основных узлов в режимах приема и передачи, для этого на рис. 3 представлена упрощенная внутренняя структура трансиверов SX1272/3.

Структурная схема SX1272/3 содержит типовые блоки, по функциональному назначению их можно отнести к приемному или передающему трактам, схеме формирования частот, интерфейсу ввода/вывода с конфигурационными регистрами или подсистеме питания.

Радиоприемный тракт выполнен по схеме с однократным квадратурным преобразованием на низкую промежуточную частоту. Такая схема получила наибольшее распространение в современных однокристалльных решениях, поскольку позволяет реализовать лучшие характеристики радиоприемного устройства в части чувствительности и избирательности по соседнему каналу по сравнению со схемой прямого преобразования. Принимаемый сигнал усиливается при помощи малошумящего усилителя, для упрощения проектирования

Таблица 2. Основные характеристики трансиверов семейства SX127x

Наименование	Диапазон рабочих частот, МГц	Коэффициент расширения спектра	Ширина полосы пропускания, кГц	Бюджет канала связи, дБ (макс.)	Потребление тока в режиме приема, мА	Скорость передачи при использовании модуляции LoRa, кбит/с	Чувствительность, дБм	Выходная мощность, дБм (макс.)	Доступные типы модуляции
SX1272	860–1020	6–12	125–500	157	10,5–13,0	0,24–37,5	–117...–137	+20	FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK, LoRa
SX1273	860–1020	6–9	125–500	150	10,5–13,0	1,7–37,5	–117...–130		
SX1276	137–1020	6–12	7,8–500	168	10,8–13,8	0,018–37,5	–111...–148		
SX1277	137–1020	6–9	7,8–500	159	10,8–13,8	0,11–37,5	–111...–139		
SX1278	137–525	6–12	7,8–500	168	10,8–13,8	0,018–37,5	–111...–148		
SX1279	137–960	6–12	7,8–500	168	10,8–13,8	0,018–37,5	–111...–148		

и минимизации внешних компонентов используется несимметричный входной сигнал. Далее, для устранения гармоник происходит преобразование в дифференциальную форму, затем квадратурные сигналы промежуточной частоты, полученные в смесителе, усиливаются в тракте промежуточной частоты и поступают на два сигма-дельта АЦП. Вся дальнейшая обработка (фильтрация, демодуляция и т. д.) выполняется над сигналом, представленным в цифровом виде. Подавление зеркального канала осуществляется за счет квадратурного преобразования.

Из полезных функций следует отметить встроенный блок сверхбыстрой автоподстройки частоты (AFC), схемы индикации уровня мощности принимаемого сигнала (RSSI) с широким динамическим диапазоном 127 дБ и автоматической регулировки усиления.

Энергопотребление в режиме приема не превышает 13 мА при напряжении питания 3,3 В и ширине полосы пропускания 500 кГц, что выгодно отличает трансиверы SX1272/3 от аналогичных решений других известных производителей. Радиоприемный тракт также характеризуется отличными селективными свойствами (численные показатели указаны для модуляции LoRa):

- избирательность по соседнему каналу: не менее 72 дБ (при SF=12);
- подавление зеркального канала: не менее 66 дБ;
- динамический диапазон блокировки: 82,5 дБ (при отстройке на ± 1 МГц); 89 дБ (при ± 10 МГц);
- интермодуляционные искажения 3-го порядка: $-12,5$ дБм.

В радиопередающем тракте сигнал гетеродина модулируется с помощью цифрового модулятора, после чего усиливается. Можно использовать один из трех усилителей мощ-

ности: первый, подключенный к выводу RFO, обеспечивает усиление до +14 дБм (20 мВт), остальные два, соединенные с PA_Boost, при использовании рекомендованной согласующей цепи выдают до +20 дБм (100 мВт). Ток потребления в режиме передачи вырастает, при выходной мощности +13 дБм он составляет 28 мА.

Блок формирования частоты с фазовой автоподстройкой и делителем генерирует рабочую частоту приемника и передатчика, интегрированный синтезатор частот имеет разрешение 61 Гц. Основным источником тактовых импульсов для синтезатора частоты является кварцевый генератор на 32 МГц, который также обеспечивает синхронизацию цифровой части микросхемы.

Интегрированная схема управления пакетами данных, используемая совместно с 64-байтным буфером FIFO, автоматизирует процесс приема, передачи и обработки данных (генерацию преамбулы, вставку и обнаружение синхрослова, проверку адреса, гибкий выбор длины пакета и т. д.) и значительно снижает нагрузку на внешний микроконтроллер. Также возможно функционирование в автономном режиме без внешнего управления и контроля. В этом случае применяется встроенный программируемый автомат состояний, задающий последовательность и условия перехода между режимами работы по заранее заданному алгоритму. Временные интервалы автомата состояний задаются при помощи встроенных таймеров.

Среди дополнительных полезных функций можно отметить наличие встроенного датчика температуры и индикатора пониженного напряжения питания, генерирующего сигнал прерывания при достижении заданного порога. Конструктивно трансиверы изготавливаются

в малогабаритных пластиковых корпусах QFN-28 размерами всего 6×6 мм.

Все вышесказанное, за исключением значений ключевых параметров, относится и к устройствам SX1276/7/8/9 [7]. Они имеют схожую с SX1272/3 структуру и принципы функционирования, поэтому рассмотрим только их немногочисленные отличия:

- это широкий диапазон рабочих частот, обеспечивающий гибкость применения и включающий не требующие лицензирования ISM-частоты 433, 868 и 915 МГц; 137–1020 МГц (у SX1276 и SX1277), 137–525 МГц (у SX1278) и 137–960 МГц (у SX1279);
- использование двух входных/выходных каналов для работы на разных частотах.

Отличная чувствительность приема (до -148 дБм, кроме SX1277: -139 дБм) и выходная мощность передатчиков, программируемая до +20 дБм с шагом 1 дБ, позволяют обеспечить энергетический бюджет канала связи в 168 дБ. Малое собственное энергопотребление — до 13,8 мА в режиме приема (при максимальной полосе пропускания) и 29 мА в режиме передачи при выходной мощности +13 дБм — значительно увеличивает срок бесперебойной службы беспроводного модуля. В спящем режиме потребляется не более 100 нА, при этом гарантируется сохранение содержимого внутренних управляющих регистров.

Трансиверы SX1276/7/8/9 обладают отличными показателями по интермодуляционным искажениям третьего порядка (IP3). При максимальном усилении и чувствительности этот показатель составляет -11 дБм, что в сочетании с избирательностью по соседнему каналу (не менее 72 дБ) и избирательностью по зеркальному каналу (не менее 66 дБ) позволяет получить наиболее устойчивое и надежное решение для различных условий эксплуатации.

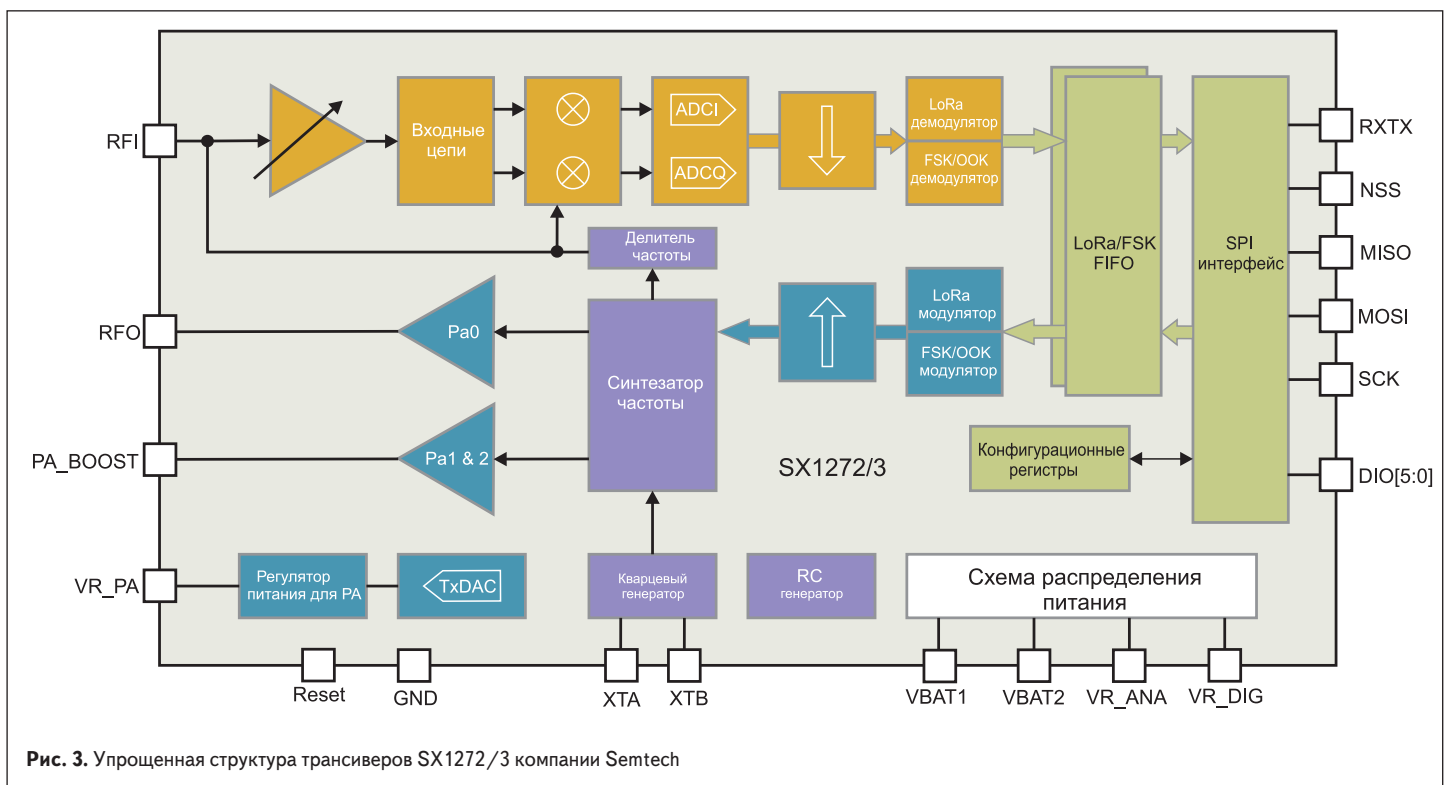


Рис. 3. Упрощенная структура трансиверов SX1272/3 компании Semtech

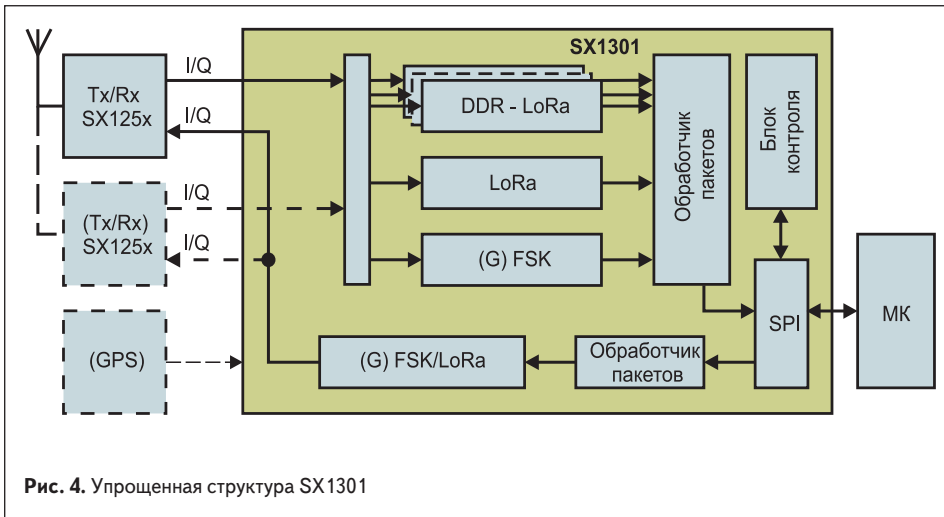


Рис. 4. Упрощенная структура SX1301

ИС SX1301

В шлюзах, выступающих в качестве моста между узлами сети и сервером и обеспечивающих межсетевое взаимодействие между LoRa и Ethernet, компанией Semtech рекомендуется применение ИС SX1301 [8]. Она представляет собой цифровой процессор канала радиосвязи для устройств ISM-диапазона, способный в условиях интерференционных помех обслуживать до 5 тыс. конечных узлов на каждый квадратный километр. На рис. 4 представлена упрощенная структурная схема SX1301.

Отличительные характеристики SX1301:

- чувствительность до $-142,5$ дБм при совместной работе с маломощными трансиверами SX125x;

- возможность работы с отрицательным отношением сигнал/шум (до -9 дБ);
- эмуляция $49 \times$ LoRa-демодуляторов и $1 \times$ (G) FSK-демодулятора;
- двойной цифровой TX&RX-радиоинтерфейс;
- динамическая адаптация канала под различные скорости передачи (DDR, Dynamic data rate);
- 10 параллельных программируемых каналов демодуляции.

Перспективные области применения устройств LoRa

Несмотря на новизну стандарта LoRaWAN, на рынке сетевых приложений уже доступно множество примеров его практического при-

менения, в том числе реализованных и на территории России. Так, компания Kerlink выбрала технологию LoRa Semtech для получения большей дальности связи спроектированной станции «Интернета вещей», что позволит интеграторам строить свои собственные сети, контролируемые оборудованием или различными датчиками и счетчиками.

На рис. 5 показано, как станция LoRa IoT обеспечивает сбор данных с конечных узлов (LoRaMote) и передает полученную информацию посредством Ethernet (по умолчанию) или GPRS (после конфигурирования) на сервер iot.semtech.com [9]. Сервер содержит список доступных IoT-станций (шлюзов), показывает активность и карту сети, а также хранит и отображает принятые данные от каждого узла в текстовом или графическом виде (рис. 6).

В настоящее время M2M-оператор Senet внедряет 20 тыс. LoRa-устройств от Semtech с программным обеспечением IBM LRSC, чтобы отслеживать уровни в газовых и топливных баках, находящихся на территории жилых зданий и предприятий на западном и восточном побережьях США. Каждый час сенсоры собирают и передают по защищенным каналам связи информацию об уровне топлива в баках, состоянии измерительных приборов и рекламировке датчиков поставщикам горячего, которые впоследствии принимают решения о необходимости пополнения запасов.

В России решения на базе LoRaWAN активно продвигает оператор LACE (<http://lace.org.ru/>), который на данный момент запустил сервис в Москве и Санкт-Петербурге, а в ближайшее время планирует обеспечить покрытие всех городов-миллионников.

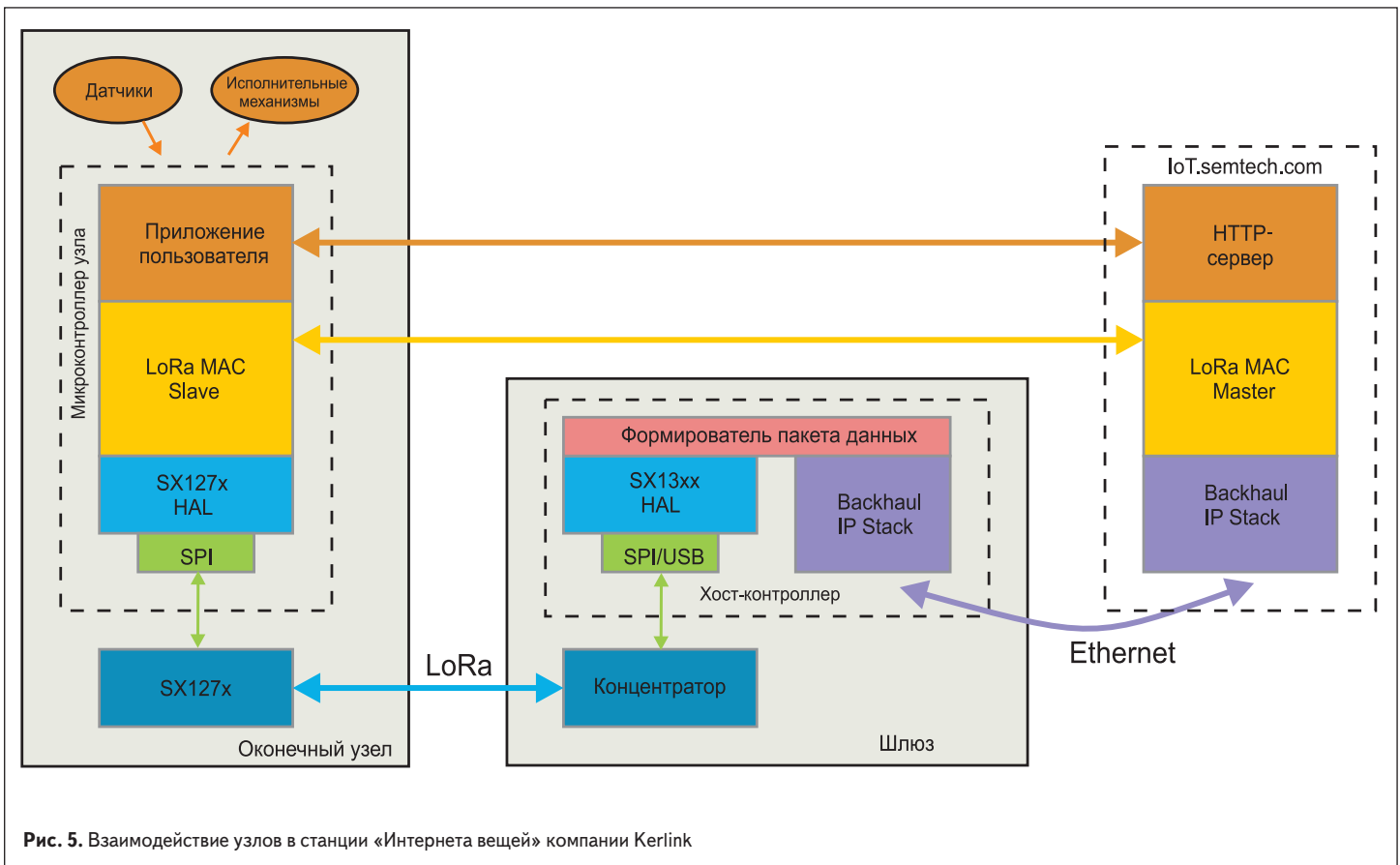


Рис. 5. Взаимодействие узлов в станции «Интернета вещей» компании Kerlink

Напоследок отметим наиболее перспективные области внедрения LoRa-устройств:

- **Охрана здоровья.**
Специальные автономные многофункциональные датчики могут быть использованы для дистанционного контроля здоровья и в системах оповещения об экстренных изменениях состояния организма человека, а также в продукции для фитнеса, измеряющей шаги, вес, кровяное давление и т. д.

- **Энергетика.**
Построение автоматизированных «умных сетей» электроснабжения для повышения эффективности использования энергии в зданиях и на производственных предприятиях, а также стабильности поставок электроэнергии. Ожидается, что беспроводные датчики и исполнительные механизмы будут в скором времени интегрированы во все виды устройств, потребляющих энергию (лампы, выключатели, телевизоры и т. п.), и смогут взаимодействовать с поставщиками энергии для организации оптимального энергетического баланса.

- **«Умный город».**
Популярная некогда концепция «умного дома» сменилась идеей «умного города», когда все устройства города соединяются между собой. Беспроводные модули осуществляют мониторинг механических, электрических и электронных систем, используемых в современных зданиях, а также контроль доступа, при этом они абсолютно не зависят ни от системы электропитания, ни от коммуникаций.

- **Транспорт.**
Для осуществления разнообразных функций коммуникации в транспортных системах, для построения систем контроля загруженности автодорог, «умных парковок», логистических систем, а также контроля безопасности и помощи на дорогах.

- **ЖКХ.**
Применение интеллектуальных беспроводных счетчиков помогает легко

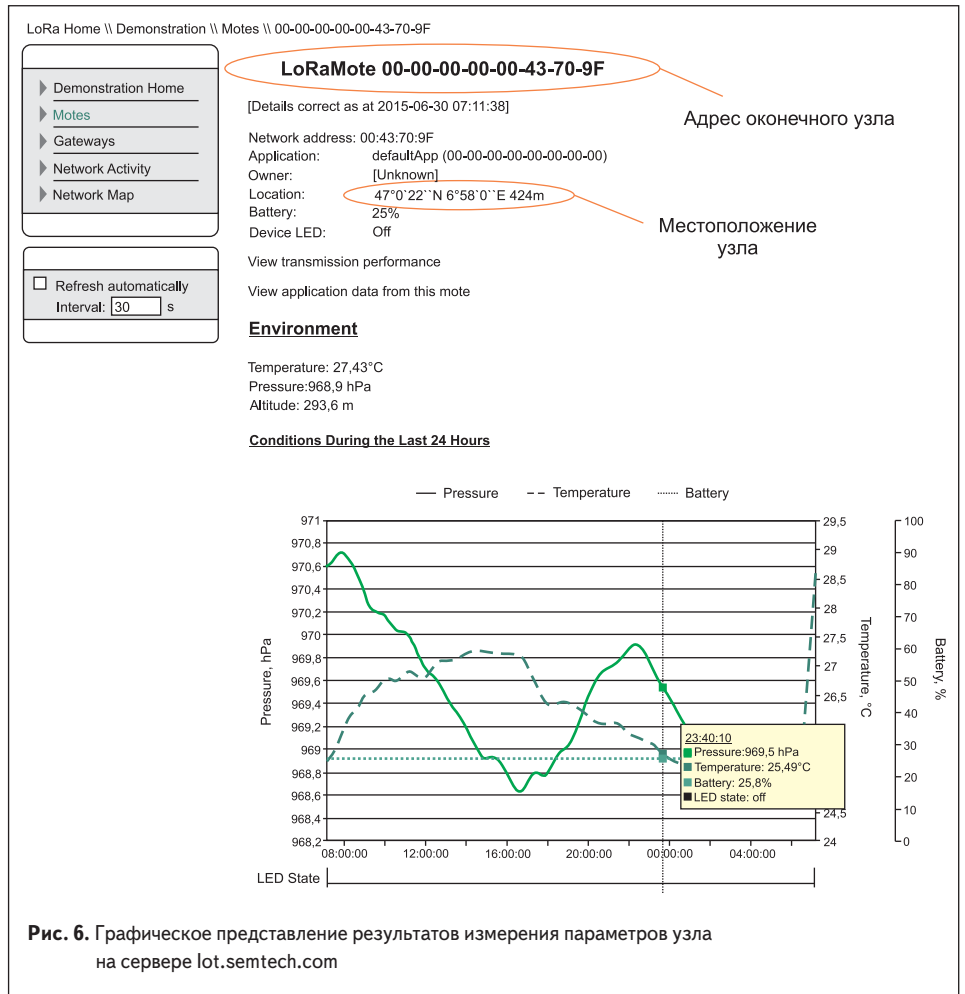


Рис. 6. Графическое представление результатов измерения параметров узла на сервере lot.semtech.com

организовать автоматизированный учет расходов энергоресурсов (воды, тепла, газа, электроэнергии) в квартирах, коттеджах и в офисных зданиях, а также в режиме реального времени отслеживать состояние применяемого оборудования и в случае воз-

никновения аварийных ситуаций оперативно на них среагировать.

На последнем пункте остановимся немного подробнее. Очевидно, что применение LoRa-технологии актуально прежде всего для производителей счетчиков, которые

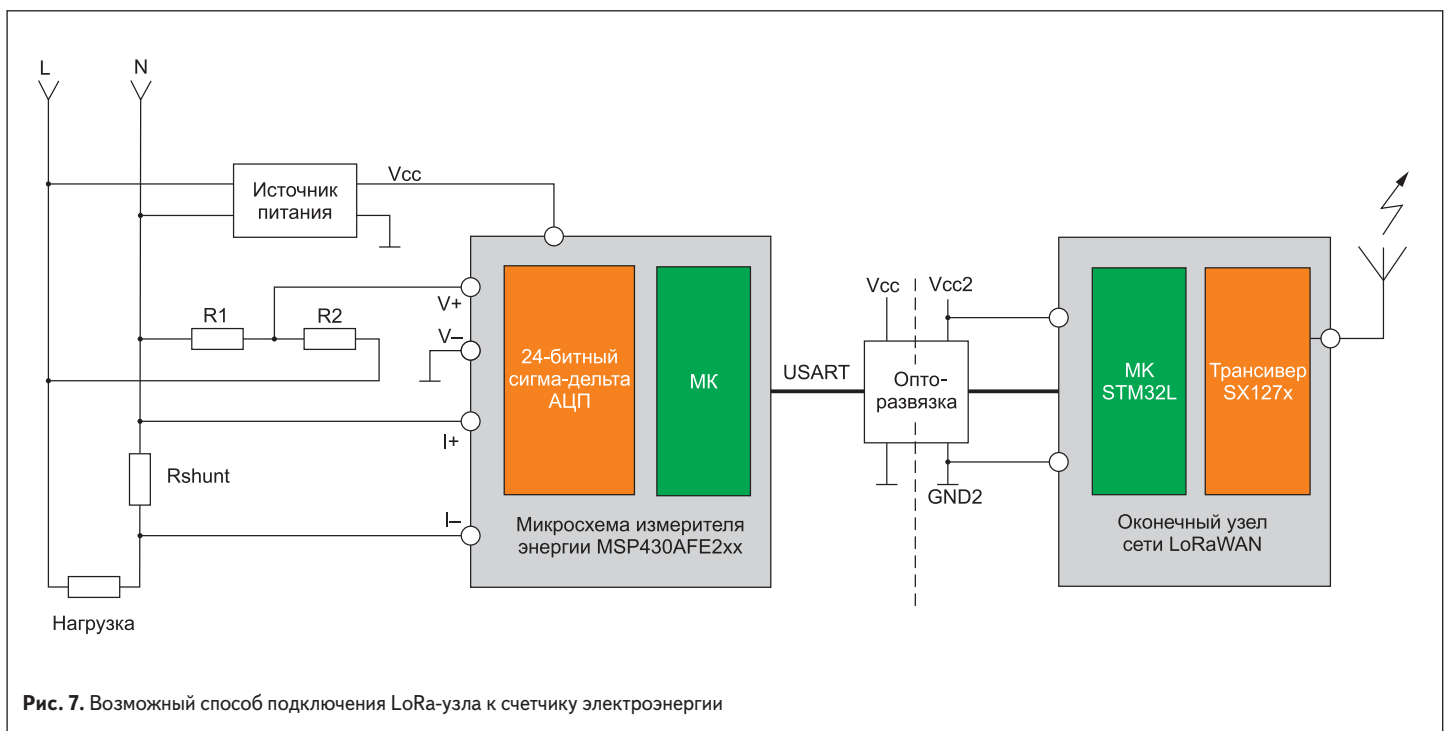


Рис. 7. Возможный способ подключения LoRa-узла к счетчику электроэнергии

еще на этапе проектирования могут внести в схему и конструкцию необходимые изменения. Но при желании возможна и адаптация разнообразных устройств, применяемых в настоящее время в ЖКХ, под стандарт LoRaWAN, используя микроконтроллер, составляющий основу оконечного узла сети. В этом случае он осуществляет взаимодействие посредством распространенных цифровых интерфейсов (USART, SPI и т. д.) с интеллектуальными трехфазными счетчиками на основе микропроцессоров или специализированных ИС либо обеспечивает функцию измерения импульсов от простейших механических однофазных счетчиков при помощи встроенных таймеров. Для примера на рис. 7 показано соединение модуля LoRa с популярным измерителем энергии от компании TI.

Заключение

Распространение экономически эффективных технологий беспроводной связи и широкая

доступность системных решений привели к резкому росту «Интернета вещей». Новые трансиверы компании Semtech, построенные с применением технологии LoRa, обладают превосходной чувствительностью приемника, малым собственным энергопотреблением, отличной помехозащищенностью линии связи и широкими функциональными возможностями. Наличие открытого протокола LoRaWAN с примерами кода ускоряет процесс разработки беспроводных устройств. Все это в совокупности позволяет реализовывать более простые сети передачи данных с увеличенным радиусом действия, длительным временем автономной работы и гарантированным обнаружением полезного сигнала на фоне воздействия помех. ■

Литература

1. www.zurich.ibm.com/pdf/lrsc/lmic-release-v1.5.zip
2. www.github.com/Lora-net/LoRaMac-node
3. Верхулевский К. Однокристалльные ISM-трансиверы Semtech: уверенная связь в сложных условиях // Компоненты и технологии. 2013. № 6.
4. SX1272/3/6/7/8: LoRa modem design guide // Application note 1200.13, rev.1, July 2013. www.semtech.com
5. Wireless RF Solutions. Selector Guide. 2014. www.semtech.com
6. SX1272/73 — 860 MHz to 1020 MHz Low power long range transceiver. Datasheet, rev. 3, March 2015. www.semtech.com
7. SX1276/77/78/79 — 137 MHz to 1020 MHz Low power long range transceiver. Datasheet, rev. 4, March 2015. www.semtech.com
8. SX1301 — Base band processor for data concentrator for long range communication network. Preliminary product brief, February 2014. www.semtech.com
9. Kerlink LoRa IoT station. User guide, rev. 1.1, July 2014. www.kerlink.fr/en/products/lora-iot-station